

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Г. О. Кривов, С. Г. Кривова, К. О. Зворикін, О. Є Зубаньов

ОСНОВИ СИСТЕМНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

Навчальний посібник

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів закладів вищої освіти
спеціальності 131 «Прикладна механіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензенти: *Митрахович М. М.*, д-р. техн. наук, проф., генерал-лейтенант, ДП «Івченко-Прогрес»
Бобир М. І., д-р. техн. наук, проф., чл. кор. НАНУ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Відповідальний редактор *Трубачев С. І.*, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 5 від 26.05.2022 р.) за поданням Вченої ради Механіко-машинобудівного інституту (протокол № 6 від 31.01.2022 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Кривов Георгій Олексійович, д-р техн. наук, проф., АТ «Український науково-дослідний інститут авіаційної технології»

Кривова Світлана Георгіївна, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Зворикін Костянтин Олегович, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Зубаньов Олександр Євгенович, магістр прикладної механіки, АТ «Український науково-дослідний інститут авіаційної технології»

ОСНОВИ СИСТЕМНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Основи системної інженерії [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» / Г. О. Кривов, С. Г. Кривова, К. О. Зворикін, О. Є. Зубаньов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 17 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 322 с.

Наводяться основні вступні відомості модуля «Системна інженерія» дисципліни «Системна інженерія та управління проектами в наукоємному машинобудуванні» освітньої програми другого (магістерського) рівня вищої освіти. Розглядаються засадничі підходи і методологічні інструменти для забезпечення процесів системної інженерії. Навчальний посібник сприятиме поглибленому та більш детальному опануванню сутності системного підходу та розумінню поняття життєвого циклу складних технічних систем, переважно для процесів створення, виробництва та підтримки і супроводження в експлуатації складних виробів різних галузей наукоємного машинобудування.

© Кривов Г. О., Кривова С. Г., Зворикін К.О., Зубаньов О. Є., 2022
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	7
ГЛАВА 1: ПОДАННЯ СИСТЕМНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ.....	13
1.1 СИСТЕМА	13
• Системи, що становлять об'єкти фізичної природи	15
• Складні інженерні системи	15
• Система та її оточення.....	21
• Системне розбиття	24
• Системне мислення, системне подання.....	31
1.2 СИСТЕМНА ІНЖЕНЕРІЯ.....	38
• Системи, що створюються системними інженерами	45
• Етапи розвитку системної інженерії.....	47
• Системна інженерія та управління проєктами.....	50
• Нормативні публічні документи системної інженерії	63
1.3 Підсумки	67
• Що таке «система»?	67
• Що таке «системна інженерія»?	70
Питання для САМОКОНТРОЛЮ ГЛАВИ 1	73
ГЛАВА 2: ПОДАННЯ ТА ОПИС СКЛАДНИХ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ	75
2.1 СТРУКТУРА ТА РОЗБИТТЯ СИСТЕМИ	75
• Проєктні ролі у системі	75
• Ієрархія рівнів у складних інженерних системах	77
• Опис декомпозиції системи	81
• Функціонально-фізичне подання систем.....	83
2.2 ПОНЯТТЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ СИСТЕМИ	91
• Модель життєвого циклу	92
• Еволюція уявлень про моделі життєвого циклу інженерних систем.....	93
• Модель життєвого циклу з позиції системного інженера	113

• Метод вироблення проєктних рішень у системній інженерії.....	117
• Стадія передрозробки нової системи.....	120
• Стадія розробки нової системи.....	124
• Стадія построзробки нової системи.....	128
2.3 Підсумки	136
• Структура та розбиття системи	136
• Поняття життєвого циклу системи.....	138
Питання для самоконтролю глави 2	140
ГЛАВА 3: СТАДІЯ ПЕРЕДРОЗРОБКИ СИСТЕМИ.....	142
3.1 ПОТРЕБИ У СТВОРЕННІ СИСТЕМИ	142
3.2 ЕТАП АНАЛІЗУ ПОТРЕБ У СИСТЕМІ.....	150
• Системний аналіз	152
• Аналіз та розроблення функціональних вимог.....	153
• Оцінка здійсненності	155
• Валідація потреб	156
3.3 ЕТАП ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ СИСТЕМИ	159
• Аналіз вимог призначення	162
• Аналіз та розроблення функціональних вимог.....	164
• Дослідження концепції.....	169
• Валідація вимог до показників функціонування	172
3.4. ЕТАП ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ СИСТЕМИ	174
• Аналіз вимог щодо показників функціонування	177
• Аналіз та розроблення функціональних вимог.....	178
• Вибір концепції	181
• Валідація концепції.....	184
3.5 Підсумки	186
• Вираз потреб з позиції системного інженера.....	186
• Підсумки етапу аналізу потреб у системі.....	187
• Підсумки етапу дослідження концепції системи	188
• Підсумки етапу визначення концепції системи.....	191
Питання для самоконтролю глави 3	194
ГЛАВА 4: СТАДІЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ.....	196

4.1 ЕТАП ЕСКІЗНОГО ПРОЄКТУВАННЯ	196
• Аналіз функціональних вимог	199
• Аналіз функціонування	203
• Розроблення ескізного проєкту	209
• Випробування.....	211
4.2 ЕТАП ТЕХНІЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ	214
• Аналіз вимог	217
• Аналіз функціонування та ефективності проєктування.....	220
• Проєктування компонентів	221
• Валідація	224
4.3 ЕТАП ІНТЕГРАЦІЇ, АТЕСТАЦІЇ–СЕРТИФІКАЦІЇ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА	231
• Планування випробувань	240
• Визначення випробувального устаткування.....	241
• Складання – інтеграція системи	244
• Попередні випробування системи.....	247
• Натурні випробування, атестація, сертифікація	252
4.4 Підсумки	253
• Підсумки етапу ескізного проєктування	253
• Підсумки етапу технічного проєктування.....	257
• Підсумки етапу інтеграції, атестації–сертифікації дослідного зразка	260
ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ГЛАВИ 4.....	261
ГЛАВА 5: СТАДІЯ ПОСТРОЗРОБКИ СИСТЕМИ.....	264
5.1 ПРОДОВЖЕННЯ РОЛІ СИСТЕМНОГО ІНЖЕНЕРА	264
5.2 ЕТАП ВИРОБНИЦТВА СИСТЕМИ.....	266
• Забезпечення технологічності системи у виробництві.....	267
• Підготовлення до виробництва	272
• Організація та технологія виробництва.....	274
• Приймальні випробування системи	277
5.3 ЕТАП ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА СУПРОВОДУ СИСТЕМИ	279
• Освоєння в експлуатації.....	281
• Супровід в експлуатації.....	282

• Модернізація.....	284
5.4 ЕТАП УТИЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ	286
• Усвідомлення актуальності проблеми утилізації	289
• Планування утилізації	292
• Виконання процесів утилізації	294
• Тенденції щодо утилізації авіатехніки.....	296
5.5 Підсумки	300
• Продовження ролі системного інженера.....	300
• Підсумки етапу виробництва системи.....	301
• Підсумки етапу експлуатації та супроводу системи	304
• Підсумки етапу утилізації системи	305
Питання для самоконтролю глави 5	308
УСТАЛЕНІ АБРЕВІАТУРИ, ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ ТА ЇХНІ РОЗКРИТТЯ.....	309
ЛІТЕРАТУРА	314

Передмова

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується зростаючою конкуренцією виробників наукоємної продукції у високотехнологічних галузях діяльності.

Перемогу тут можна здобути лише використовуючи найсучасніші методи та інструменти управління всім життєвим циклом наукоємного продукту. Образно кажучи – ці методи-інструменти дозволяють процес створення продукту, який, за загальною думкою, багато в чому належить до галузі «мистецтва», наблизити до «ремесла». Звичайно, у цій галузі діяльності від ключових учасників процесу завжди буде потрібно багато творчості, натхнення, захопленості роботою, евристики у виробленні та прийнятті рішень. Проте, як свідчить практика, багато процесів та операцій можуть бути істотно впорядковані, спрощені і регламентовані.

Сьогодні існує два основних підходи, що дозволяють вирішувати ці непрості завдання. Перший підхід – це методологія проєктного управління, яка розглядає процес створення чогось нового спрощено, як певний проєкт із властивими йому бізнес-процесами, фазами, етапами, точками прийняття ключових рішень, термінами та ресурсами. Другий підхід – це методологія системної інженерії, яка розглядає наукоємний продукт, як систему, із властивими їй особливостями, у тому числі емерджентністю – здатністю проявляти нові властивості, які не притаманні окремим її елементам, та специфічними закономірностями розвитку на всьому протязі життєвого циклу системи.

Обидві ці методології тісно взаємопов'язані. Перша з них дозволяє певною мірою формалізувати цикл створення нового

продукту, пов'язуючи бізнес-потреби із основними фазами проекту його створення, а також із термінами та ресурсами, дозволяючи ефективно керувати ними. Друга - методологія системної інженерії, фокусується на основних сутностях створюваного продукту: визначенні вимог до нього, виявленні функцій, здатних задовольнити ці вимоги, забезпеченні їх матеріального втілення у формі, яка дозволяє задовольнити задані вимоги, і, зрештою, потреби у створюваному продукті. Вочевидь, що лише у тісній єдності ці дві методології дозволяють досягти цілей забезпечення конкурентоспроможності виробника на сучасних ринках наукоємної продукції.

Зазначимо, що методологія проєктного управління за останні десятиліття вже пройшла стадію становлення і дедалі більше стає повсякденним та ефективним інструментом управління інноваційною діяльністю, особливо у наукоємних її галузях.

В Україні, в її закладах вищої освіти, також, як і у провідних університетах світу, ведеться підготовка фахівців з управління проєктами, організуються спеціалізовані курси, семінари для працівників наукоємного виробництва, проводяться науково-методологічні заходи, готуються відповідні підручники та посібники.

На відміну від цього, в Україні інша ситуація з методологією системної інженерії. Незважаючи на те, що ще у 2016 році було прийнято національний стандарт ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016 «Інженерія систем та програмного забезпечення. Процеси життєвого циклу систем (ISO/IEC/IEEE 15288:2015, IDT)» [1], ідентичний основному міжнародному стандарту ISO/IEC/IEEE 15288:2015 «Systems and software engineering –

System life cycle processes» [2], в наукоємному машинобудуванні «системний підхід» та «системну інженерію» продовжують використовувати здебільшого формально. Переважно це помилково ув'язують із вимогами власних систем управління якістю, на які, як правило, вже атестовані українські підприємства. З іншого боку, підходи системної інженерії давно та ефективно використовуються у комп'ютерних технологіях українських ІТ-підприємств. Методологія системної інженерії дедалі частіше включається до спеціалізованих освітніх магістерських програм українських технічних університетів. Наприклад, у КПІ ім. Ігоря Сікорського в курсі «Методологія проектування» викладаються основні положення системного підходу та системного інжинірингу.

Ймовірно, як відгук на існуючі виклики розвитку наукоємного виробництва в Україні, у березні–червні 2021 року Державним концерном «Укроборонпром», спільно із Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» для фахівців оборонних галузей промисловості була організована «Школа професійного розвитку інженерів-конструкторів», в рамках якої фахівцями «Українського науково-дослідного інституту авіаційної технології» був підготовлений та прочитаний курс лекцій «Основи системної інженерії». Зважаючи на актуальність предмета, його затребуваність фахівцями, за матеріалами цих лекцій авторами і був підготовлений цей навчальний посібник «Основи системної інженерії». Під час підготовки цього матеріалу перед його авторами стояло досить нетривіальне завдання.

А саме, як, не применшуючи минулий вітчизняний досвід, окремі сьогоденні практики у створенні найпередовіших зразків оборонної техніки, мотивувати досвідчених фахівців до ознайомлення із основними поняттями та інструментами сучасної системної інженерії?

В результаті був прийнятий наступний підхід: максимально можливою мірою спиратися на минулі та існуючі практики, що використовуються вітчизняними продуцентами наукоємної продукції, а з метою актуалізації та урахування сучасних методів та інструментів використовувати найкращий із відомих у цій галузі зарубіжних підручників.

Як актуальні практики в навчальному посібнику коротко наведені нормативно-методичні матеріали, що використовуються вітчизняними фахівцями, а також узагальнений авторський досвід робіт у галузі створення наукоємних продуктів. Окремо зазначимо, що враховуючи теперішні обставини, але все ж таки ґрунтуючись на вищевказаному підході, було вирішено не вилучати із розгляду актуальні технічні нормативи РФ, оскільки це лише зміцнює та розширює наше розуміння різних аспектів системної інженерії.

З численних відомих авторам навчальних посібників за тематикою системної інженерії був обраний один із найкращих, на нашу думку, сучасних зарубіжних підручників у цій галузі: «Системна інженерія. Принципи та практика» автори: Олександр Косяков, Світ Вільям Н, Сеймур Семюель Дж., Бімер Стівен М., його друге видання, переклад з англійської та за редакцією Б. К. Батовріна. На момент підготовки цього посібника вже вийшло третє видання підручника англійською

мовою¹. Цей підручник широко використовується у навчальних курсах провідних американських та європейських технічних університетів, він цілком заслуговує визначення «класичний».

Головною перевагою вказаного *класичного* підручника вважаємо запропонований авторами підхід «системного мислення»: поетапного, ітераційного перетворення вихідної потреби у продукт в систему вимог стосовно нього, формалізовану спочатку у функціональному, а надалі у матеріальному вигляді, і потім відстежувану за всіма етапами життєвого циклу цього продукту. За можливості ми теж прагнули зберегти цей підхід, звичайно, повною мірою дотримуючись авторських прав і роблячи при цьому відповідні посилання.

Ще одна, на наш погляд, необхідна репліка – термінологічна. Вона стосується час від часу дискусії щодо розуміння терміну «системна інженерія» – «systems engineering» тобто, коли під цим терміном розуміється інженерія систем: «engineering of systems» – маючи на увазі ставлення до окремих об'єктів як до систем. У цьому випадку, очевидно, не настає необхідність використання системного способу мислення та багаторівневого розгляду об'єкта як сукупності систем.

На відміну від цього термін «системна інженерія» – «systems engineering» має на увазі ставлення до об'єкта, як до цілісної системи із багаторівневим розбиттям її на частини, використанні для розгляду найрізноманітніших спеціалізацій та дисциплін інженерії. Підтвердженням цьому є ще одне визначення системної інженерії із фундаментального

¹ Alexander Kossiakoff[†], Samuel J. Seymour, David A. Flanigan & Steven M. Biemer (2020). *Systems Engineering: Principles and Practice*, 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 688 pages. ISBN: 978-1-119-51666-8

навчального посібника SEBoK: «Вона (системна інженерія) фокусується на цілісному та одночасному (паралельному) розумінні потреб проєктних ролей, дослідженні можливостей, документуванні вимог і синтезуванні, перевірці, прийманні та поступовій появі інженерних рішень, у той час як до розгляду береться повна проблема, від дослідження концепції системи до виведення системи із експлуатації» – авторський переклад [3], оригінал тексту – [4].

Глава 1: Подання системної інженерії

1.1 Система

Загальна теорія *системного* представлення об'єктів навколишнього світу – *теорія систем* була сформульована, як вважається, у 30-х роках минулого століття австрійсько-канадським біологом Людвігом фон Берталанфі (Ludwig von Bertalanffy). Стосувалася вона, в основному біологічного світу, але надалі цей підхід: *прийменникові поняття, абстракції, методи мислення* були поширені на всі інші об'єкти навколишнього світу [3].

За минулі роки методи *системного* підходу, уявлення про *системи* еволюціонували. Далі для порівняння наводяться поняття *системи*, прийняті наприкінці минулого століття [5], і також загальноприйняті сьогоднішні ставлення до *систем*. Поняття *система* має різні трактування і найпоширеніші з них такі:

- Система – об'єкт будь-якої природи, що володіє вираженою системною властивістю (властивостями), тобто **властивістю якої немає у жодної із частин системи** [5].
- Система – сукупність взаємопов'язаних компонентів, які працюють **спільно для досягнення спільних цілей** [6].
- Система – як ціле складається із взаємодіючих частин, що у своїй взаємодії виявляють **емерджентність (системний ефект)**, тобто **прояв у системи властивостей, які не притаманні її частинам окремо, або не зведення властивостей системи до суми властивостей її компонентів** [3].

В основоположному на сьогодні міжнародному стандарті системної та програмної інженерії – ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2] наводиться таке визначення *системи*.

***Система* – комбінація взаємодіючих елементів, організованих задля досягнення однієї чи кількох поставлених цілей.**

У цьому ж стандарті пояснюється, що під системою може розглядатися будь-який Продукт², а також Послуги³, що забезпечують створення⁴ цього Продукту.

Ще раз, і це тут підкреслюється особливо, для того, щоб якийсь набір взаємодіючих елементів можна було вважати *системою*, має проявлятися якась властивість, якої немає у її елементів, якої вже немає у того цілого, до якого, у свою чергу, входить ця система як елемент. Цю властивість прийнято називати *емерджентністю*⁵ – **системним ефектом**.

Очевидно, таке широке розуміння *системи* передбачає, що частини *системи* можуть бути будь-якої природи – як фізичними об'єктами, так і не фізичними.

Приклад. Для абстрактних об'єктів: класів, типів, множин, структурних одиниць тощо, можна прийняти поняття *система*, але частини цієї системи не мають фізичного подання, тому взаємодія з-поміж них абстрактна.

² *Продукт*, продукція (Product) – результат процесу [2].

³ *Послуга* (Service) – виконання дій, роботи або обов'язків [2].

⁴ *Створення* в названому стандарті [2] замінюється терміном «придбання» (Acquisition), яке визначається як процес отримання системи, продукту чи послуги. Надалі термін «створення» тут за текстом контекстно застосовується у визначенні терміну «придбання» / «Acquisition».

⁵ *Емерджентність* (Emergence – що виникає, що несподівано з'являється) – наявність у системи особливих властивостей, які не притаманні її підсистемам та системним елементам, а також сумі елементів, що не пов'язані особливими системоутворюючими контактами.

- **Системи, що становлять об'єкти фізичної природи**

Для завдань інженерної практики поняття *системи* звужується до **об'єктів, які мають фізичну природу**. Слід зазначити, що тоді *системами* можуть вважатися і *процеси*, якщо вони розглядаються як діяльність із взаємодії фізичних частин якогось об'єкта.

У таких випадках з поля зору виключаються, як такі, що не мають фізичної природи, наступні *системи*: **знання, набори правил, політичні, економічні та інші аналогічні системи**. Також, через абстрактність виключаються **системи класифікацій, спеціалізацій, множини та підмножини**.

Зважаючи на те, що не можна досягнути неосяжне, фокус розгляду ще раз звужується, із об'єктів уваги виключаються системи, що мають **фізичну природу окремих своїх частин, але не є предметом інженерної діяльності в нинішньому розумінні**. Таким чином, з розгляду виключаються **біологічні системи, екосистеми та подібні до них**, а фокус робиться на інженерних системах, виділивши з них *складні інженерні системи* (рис. 1.1).

- **Складні інженерні системи**

Наступний розгляд фокусується переважно на системах, що є предметом інженерної діяльності – *складних інженерних системах*, створення яких потребує серйозних, часто унікальних, інженерних компетенцій, і результатом яких є **наукоємний продукт чи послуга, яка забезпечує створення такого продукту**.

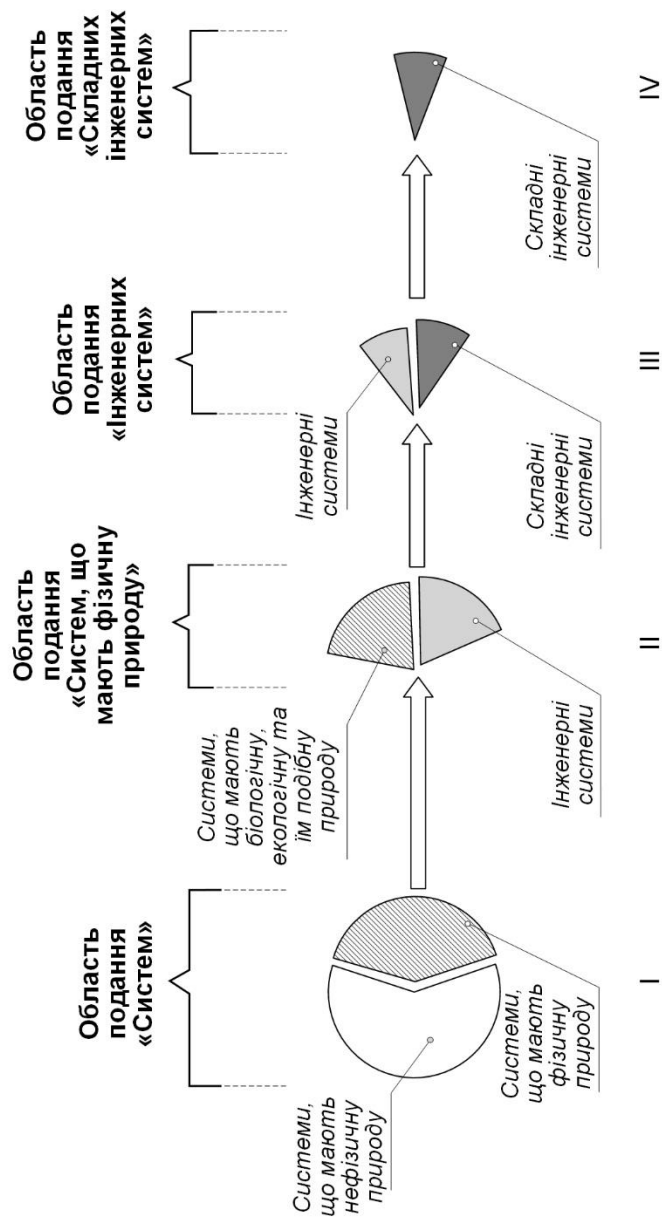


Рис. 1.1. Спрощена схема візуалізації предмета розгляду «складні інженерні системи».

Варто відзначити, що саме поняття *складна інженерна система* доволі умовне. З теорії систем випливає, що складні системи володіють такими основними властивостями:

- *унікальність* – системи цього класу за поведінкою не аналогічні до будь-якій подібній до неї;
- *слабопередбачуваність* – навіть докладне знання морфології, функцій елементів системи на одному інтервалі часу не дозволяє точно передбачити її поведінку на іншому інтервалі, відмінному від першого;
- *негентронійність-цілеспрямованість* – система за випадкової взаємодії середовища здатна змінювати поведінку, зберігаючи завдання щодо досягнення певної мети [3].

Таким чином, стосовно інженерної діяльності, у *складних системах* додається потреба у використанні спеціальних знань, компетенцій, які весь час розвиваються, а також додається участь міждисциплінарних фахівців, спеціальних методів організації робіт, великих обсягів науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт.

Умовно, більше для наочності, можна вважати **складними інженерними системами** *продукцію наукоємного виробництва*, тобто продукцію із високою питомою трудомісткістю, із високою питомою вартістю, із наявністю в її життєвому циклі визначених поствиробничих (експлуатаційних) процесів, а також створену із використанням результатів фундаментальних та спеціальних прикладних досліджень (рис. 1.2).

Варіант типології складності системи для інженерії (рис. 1.3) був запропонований INCOSE (2014 р., International Council on Systems Engineering – Міжнародна рада з системної інженерії) [6, 8].

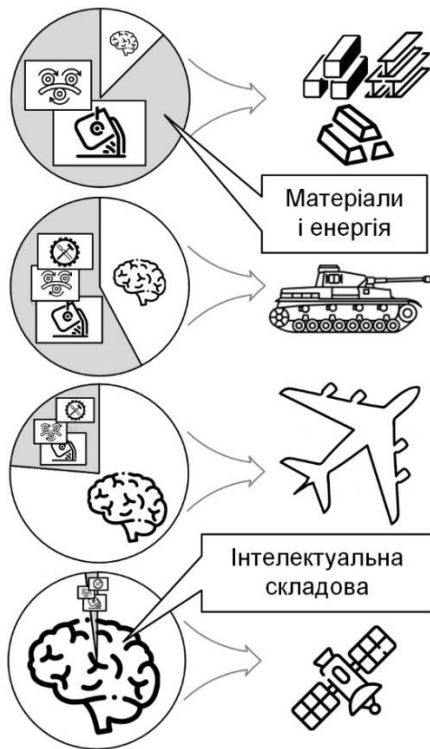


Рис. 1.2. Інтелектуальні складові компоненти промислової продукції – інженерних систем різної складності [7].

Рівні складності інженерних систем можна подати у табличному вигляді (табл. 1.1).

Наразі єдиної думки щодо категорії **складності** інженерних систем немає. У роботі Seth Lloyd «Measures of Complexity and non-exhaustive list» (Massachusetts Institute of Technology, [9]) наведено наступну градацію складності системи залежно від трьох категорій відповідей на запитання:

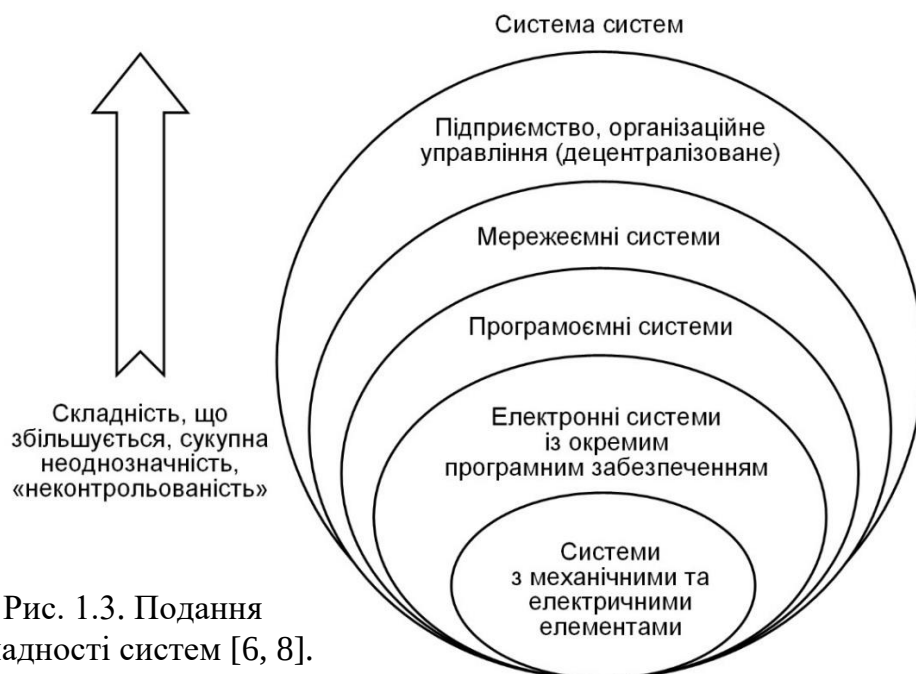
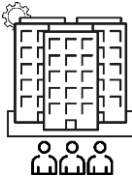


Рис. 1.3. Подання складності систем [6, 8].

Таблиця 1.1. Градація інженерних систем за рівнем складності.

Типи систем	Рівні складності інженерних систем	Приклади	
Прості	Системи з механічними та електричними елементами	Велосипед, насос, вентилятор	
Більш складні	Системи із вбудованими електронними модулями, датчиками, найпростішими програматорами	Автомобіль, пральна машина	
Складні	Системи, логіка роботи яких пов'язана із складним програмним забезпеченням	Авіація, ракетобудування, системи озброєння	
Дуже складні	Мережеві системи (системи, що інтенсивно використовують мережі)	Безпілотні літаки, апарати	
Над-складні	Системи з організаційним наглядом	Підприємства із працюючим устаткуванням	

1. Наскільки складно надати опис системи? Найчастіше «складність» оцінюється в бітах інформації, достатньої для представлення опису та інших можливих параметрах вимірювання (довжина опису, фрактальна розміреність тощо).

2. Наскільки складно створити систему? Вимірюється у часі, у витратах ресурсів, зокрема фінансових; параметри

складності: інформаційна складність, обчислювальна складність, шифрованість тощо.

3. Який ступінь організованості системи?

Поділяється на дві підкатегорії питань:

А. яка результуюча складність? – визначається складністю опису організаційної структури (корпоративної, виробничої, соціальної системи);

В. який обсяг інформації? – кількість спільно використовуваної інформації, тобто інформації, що підлягає обміну в цій організаційній структурі між окремими структурними елементами системи та середовищем функціонування.

Зрозуміло, що таким чином можна отримати лише приблизні дані для оцінки міри складності *інженерних систем*.

Слід звернути увагу на типовість ситуації із поняттям «складність» у цілому для предмета «Системна інженерія». Інтуїтивно – все ясно, проте термінологічно описи понять можуть відрізнятися та викликати дискусії. Нічого незвичайного тут нема. Занадто різні предметні спеціалізації у людей, неоднозначно та постійно розвивається уявлення про *системи*. Крім цього, залежно від ролі, яку у складі *системи* грає фахівець, і залежно від погляду на те чи інше поняття може змінюватися уявлення про складність. Ця особливість характерна для аналізованої області знання і докладніше вона буде розкрита далі у розділі, присвяченому *системному мисленню*.

Підсумовуючи та спрощуючи, *складною інженерною системою* можна вважати **об'єкт наукоємної діяльності, який складається із досить великої кількості елементів,**

пов'язаних між собою взаємодіями в такій кількості та такої різної природи, що їх не можна відстежувати, оцінювати із точністю, достатньою для проєктних дій, навіть дуже висококваліфікованому фахівцю.

- **Система та її оточення**

Використання *системного* ставлення до світу дозволяє вважати, що все, що нас оточує, є різного роду *системи*. Наприклад, транспортний літак - *система*, яка забезпечує перевезення вантажів, двигун - *підсистема* нижчого рівня, за відношенням до літка, а система забезпечення повітряного руху - *надсистема* щодо літака і так далі до нескінченності. Тому ми розуміємо, що будь-яка *система* є частиною іншої *підсистеми* чи *надсистеми*. Найчастіше такий зв'язок носить **ієрархічний** характер, хоч і не завжди, іноді і **мережевий**.

Для конкретного розгляду на рівні абстракції та відповідно до завдань аналізу зазвичай виділяється якась із *систем* цієї, в принципі, нескінченної ієрархії, і на ній на даний момент фокусується увага.

Приклад. «Літак» – *система*. Оскільки літак є предметом аналізу, необхідно розглянути із чого він складається, які функції його елементів, яка технологія виробництва цих елементів, як агрегатується тощо. Тоді таку систему називають або цільовою [3], або просто системою, маючи на увазі наявність надсистеми - суперсистеми, і нижчестоящих елементів - підсистем компонентів, субкомпонентів, деталей [6].

Система, на якій фокусується розгляд, називається системою, «*що розглядається*», в стандарті ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016 [1] або SOI — System of Interest⁶.

⁶ Система, що розглядається (System-of-Interest) - система, життєвий цикл якої розглядають у контексті стандарту ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2].

До системи, *що розглядається*, крім іншого, висуваються такі вимоги [1]:

- вибір меж системи, *що розглядається*, визначається виходячи із значущих потреб та необхідних практичних рішень;
- властивості характеристик у межах системи, *що розглядається*, визначаються результатами взаємодій між *системними* елементами;
- люди можуть розглядатися як користувачі, зовнішні за відношенням до системи, а також як її *системні* елементи у межах системи, *що розглядається*, (оператори, верстатники, наладчики тощо);
- *система* може розглядатися, як окрема сутність, в ізоляції, а також у взаємодії із навколишнім середовищем.

Очевидно, що ці, доволі широко трактовані, поняття дозволяють розробникам систем пристосовувати їх до своїх можливостей, потреб зовнішніх зацікавлених сторін та забезпечувати досягнення необхідних практичних рішень.

Там же вводиться поняття системи *забезпечення*⁷. Ці системи призначені підтримувати, полегшувати розвиток системи, *що розглядається*, протягом її життєвого циклу.

Наприклад, повертаючись до системи, *що розглядається*, «Літак»: *системи*, що забезпечують його експлуатацію, продовження ресурсу, модернізацію можуть називатися системами *забезпечення*. Відповідно, взаємозв'язки між системою, *що розглядається*, і системами *забезпечення* можуть бути односпрямованими чи двоспрямованими.

⁷ Система *забезпечення* (Enabling System) - служить доповненням до системи, *що розглядається*, протягом стадій її життєвого циклу, але необов'язково робить безпосередній внесок у її функціонування [2].

Крім вже представлені взаємодії між системою, *що розглядається*, і системами забезпечення, система, *що розглядається*, також може взаємодіяти із іншими системами в експлуатаційному для неї середовищі. Такі системи називаються системи «в середовищі функціонування» (А, В, С) [2].

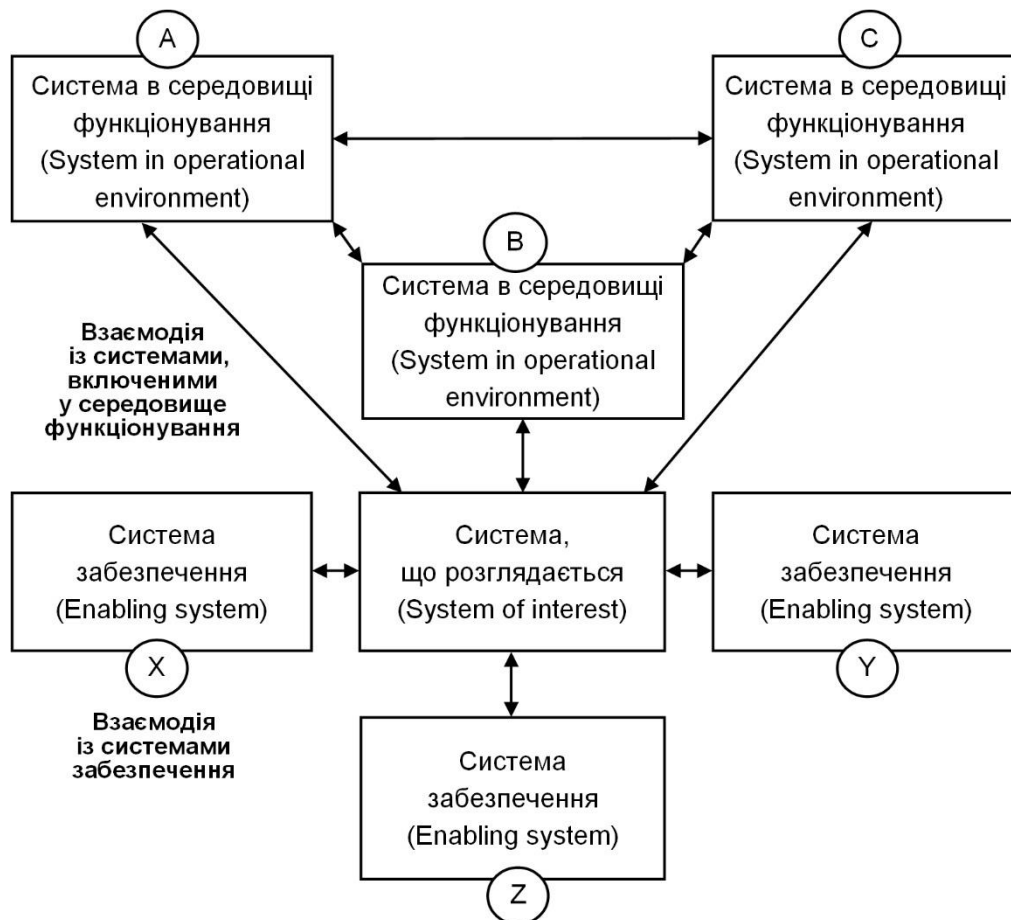


Рис. 1.4. Взаємодія систем в «середовищі функціонування» [2].

Прикладом таких систем «в середовищі функціонування», де система, *що розглядається*, «Літак», можуть бути, наприклад,

системи аеродромного забезпечення, забезпечення польотів, логістики вантажів тощо.

У переліку вимог до системи, *що розглядається*, мають бути враховані вимоги щодо взаємодії із системами *забезпечення* та системами *в середовищі функціонування*. На стадіях життєвого циклу проєктів відповідні системи *забезпечення* і системи, *що розглядаються*, зручно враховувати спільно або як єдині системи. Якщо на якомусь етапі розгляду **проєкту** не врахована необхідна для його побудови система забезпечення, тоді її створення та використання має бути передбачено. При цьому створення системи *забезпечення* може розглядатися як окремий **проєкт**.

Приклад. Формуючи проєкт «Літак», необхідно у якості системи забезпечення сформулювати **проєкт «Сервісних центрів»** із підтримки в експлуатації літаків відповідного типу.

• Системне розбиття

Раніше було прийнято, що у цій роботі зосереджуються на розгляді саме *складних інженерних систем*. Точніше, якщо використовувати наведену раніше градацію (табл. 1.1), зосередження виключно на *складних, дуже складних та надскладних* системах. Зрозуміло, що така класифікація є досить умовною, проте саме вона застосовується для навчальних цілей цього посібника. Також приймається, що системи, які тут розглядаються, **створюються людиною**, використовуються для забезпечення інтересів **користувачів** та інших **зацікавлених сторін** у продуктах та послугах. Ці системи можуть формуватися із машин та механізмів, програмних засобів, інформаційних даних, процесів, процедур (регламентів,

інструкцій користувачам), людей, матеріалів і виникаючих сутностей.

Типовим прикладом такої *складної інженерної системи* є **літак**. Одна з можливих форм подання цієї системи представлена на рисунку 1.5.

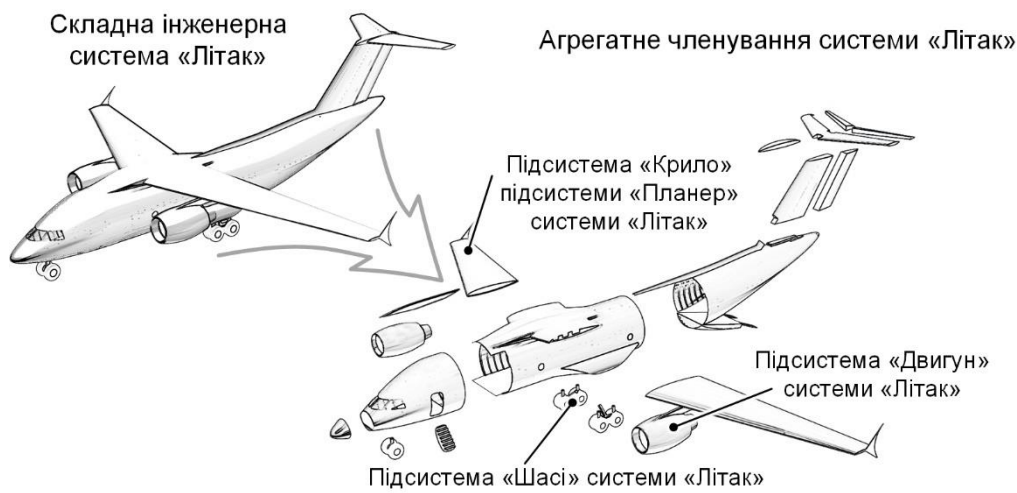


Рис. 1.5. Складна інженерна система «Літак» – та її подання агрегатним розчленуванням.

Сприйняття та визначення *системи* – її архітектури, її елементів є образними та залежать від цілей, інтересів, меж відповідальності зацікавлених сторін.

Одній зацікавленій стороні *система, що розглядається*, може представлятися як *системний елемент у системі, що розглядається*, іншої зацікавленої сторони. Наприклад, у системному поданні «**Виробництво літака XX**» для замовника цього **проєкту виробництва**, літак є *системним елементом у системі* організації його виробництва. Для розробника літака він є *системою, що розглядається*, а виробництво літака може бути представлено як *система в середовищі функціонування*.

Для наочності нижче наведено подання одних і тих самих сутностей різними **зацікавленими сторонами**: для однієї сторони – **«Виробництво літака ХХ»** є системою, що розглядається, а цехи і власне «Літак ХХ» системами та елементами системи, для іншої зацікавленої сторони – «Літак ХХ» є системою, що розглядається, а «Виробництво літака ХХ» – **середовищем функціонування** (рис. 1.6 – 1.8).

Для аналізу діяльності *складних інженерних систем* систему, що розглядається, зручно створювати із урахуванням ієрархічних відносин із нижчестоящими системами і системними елементами⁸ (рис. 1.9). У свою чергу, система, яка входить в ієрархію відносин із системою, що розглядається, може взаємодіяти із низкою системних елементів, що стоять нижче до неї. Кожна із нижчестоящих систем та системних елементів призначена для досягнення заданих для неї підцілей (рис. 1.10). При цьому мають реалізовуватися наступні умови стосовно цих системних елементів [2]:

- між системними елементами мають існувати ієрархічні чи неієрархічні відносини (наприклад, як у мережах чи у розподілених системах);
- будь-яка сутність у системі, що розглядається, на будь-якому рівні може бути представлена як система;
- система, що інтегрує у собі досягнення різних вимог, має включати певну множину нижчестоящих системних елементів, здатних реалізувати досягнення цих вимог.

⁸ Елемент системи (System Element) - член множини елементів, які становлять систему.

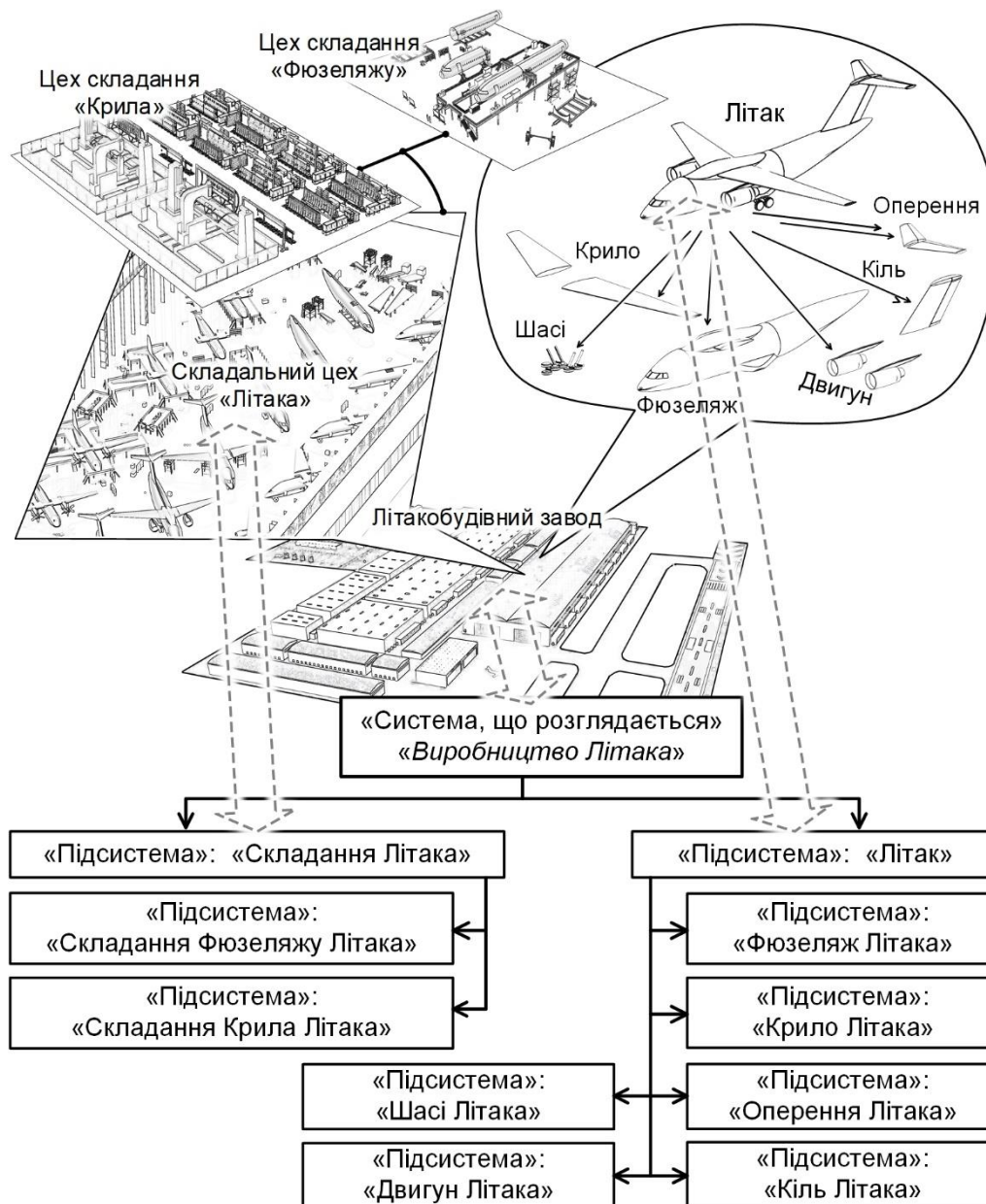


Рис. 1.6. «Агрегатно-функціонально-виробниче» подання «Виробництва літака XX».

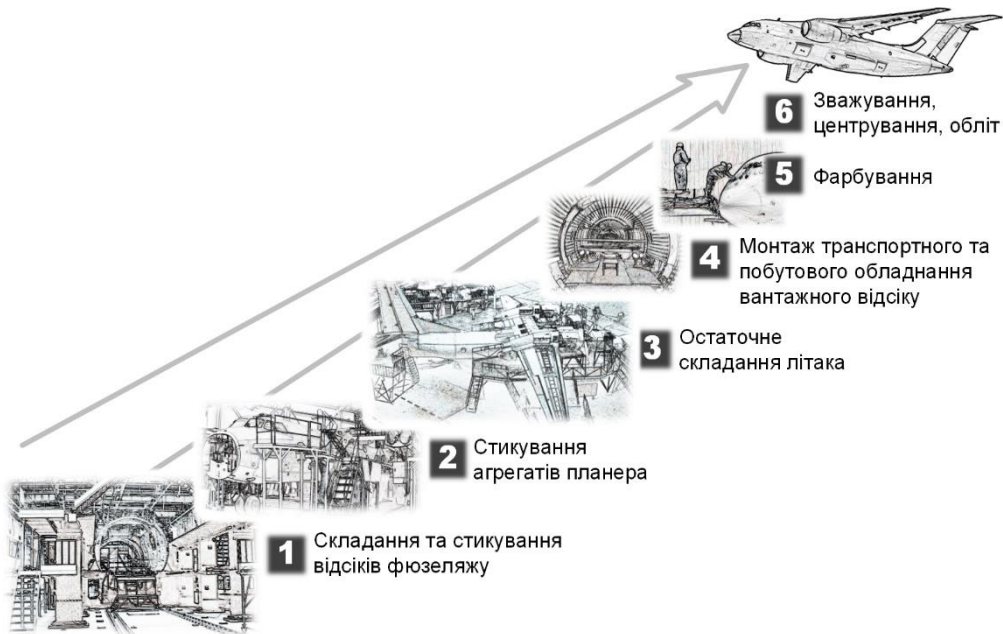


Рис. 1.8. Організаційно-проектне представлення «Виробництва літака ХХ» (типові коопераційні моделі 1...6 коопераційної взаємодії двох виробників літака) [10].

Слід зазначити, що форма *графічного подання ієрархічної структури*, наведена рисунку 1.9, зручна для ілюстрації взаємозв'язків системи, *що розглядається, із системами і системними елементами*, проте незручна для командної роботи, якщо до неї необхідно вносити правки, зміни, корекції. У роботі [3] наведено більш ефективну форму подання **ієрархії**, так званий «*аутлайн*» – *текстове подання дерева ієрархії*, де кожен рівень дерева ієрархії є відступом (рис. 1.11).

Перевага такого підходу (*текстового подання*) полягає в тому, що «*дерево, що гілкується по горизонталі*», можна уявити як просто «*довгий текст*», який набагато зручніше уявляти та правити.

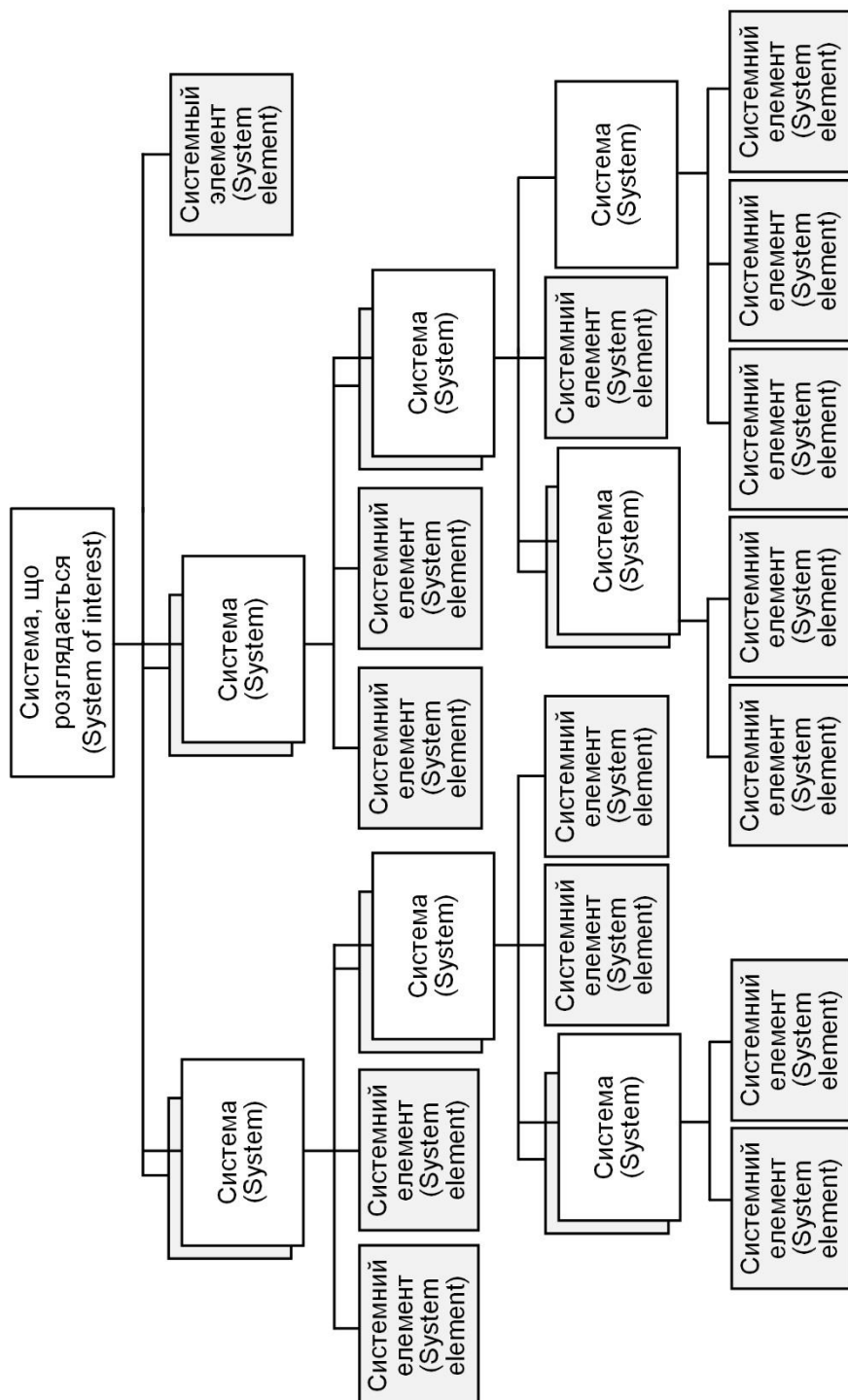


Рис. 1.9. Ієрархічне подання системи, що розглядається [2].

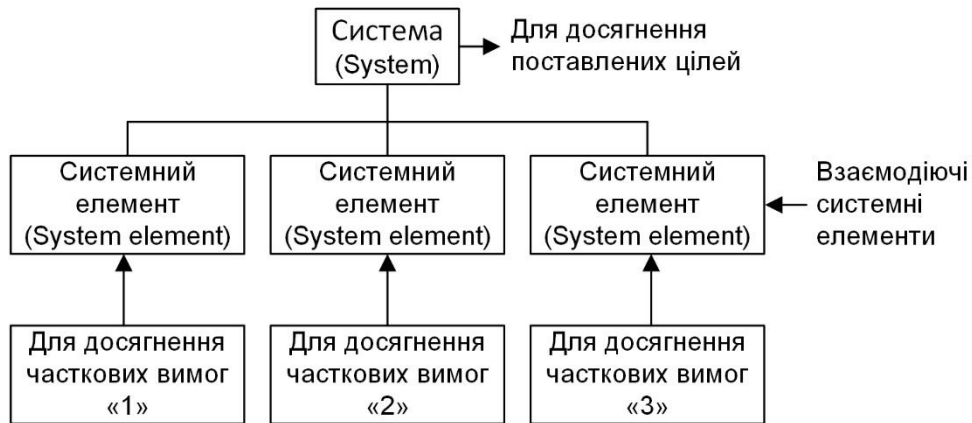


Рис. 1.10. Інтеграція досягнення поставлених вимог через системні елементи [2].

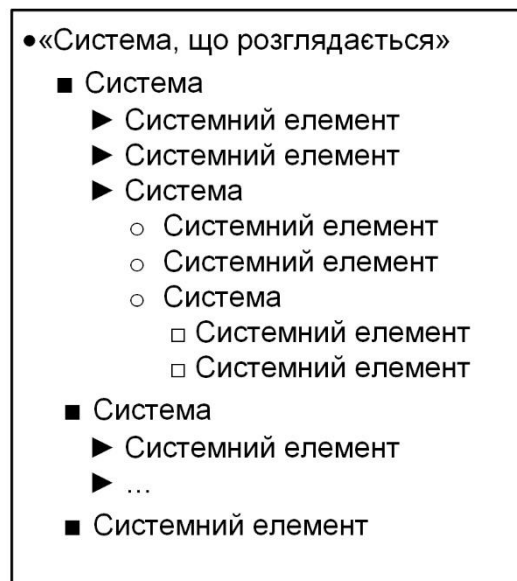


Рис. 1.11. Текстове подання «дерева ієрархії» – фрагмент графічного подання «дерева ієрархії», наведеного рисунку 1.9 [3].

• Системне мислення, системне подання

Із давньої, а також із найближчої історії загальновідомі об'єкти, які були створені людським генієм, та які і сьогодні

викликають захоплення та здивування. Наприклад, «сім чудес світу», що увійшли в історію: Піраміда Хеопса, Вісячі сади Семіраміди, Храм Артеміди Ефеської, Статуя Зевса в Олімпії, Олександрійський маяк, Колос Родоський, Мавзолей у Галікарнасі. У недавній інженерній історії – це витвори видатних авіа- та ракетних конструкторів, у тому числі вітчизняних: Антонова О. К., Янгеля М. К., Челомея В. Н., Корольова С. П., які мають безпосереднє відношення до України.

Однак подальший розвиток науково-технічного прогресу призводить до того, що те, що ще вчора було долею геніїв – першопрохідців, сьогодні стає буденністю – «робочим моментом». Щоб створити сучасний літак, необхідно інтегрувати в його конструкцію мільйони кріпильних деталей, сотні тисяч різних конструктивних елементів, тисячі агрегатів, вузлів і відповідно врахувати постачальників цих виробів. Необхідно розробляти технологічні та організаційні регламенти, що забезпечують виробництво літака, супроводження його в експлуатації. До цього можна додати, що фірмова «лінійка» літаків має оновлюватись кожні кілька років. Те саме стосується й інших надзвичайно складних галузей наукоємної високотехнологічної діяльності. Все це необхідно вміти робити багатьом сотням та тисячам людей – аж ніяк не геніям.

- *Чи можна цьому навчитися?*
- *Практика свідчить, що так! Безперечно!*
- *Як?*

Велика і складна інженерна система - наприклад, літак, авіаційний двигун, БПЛА⁹, що складаються із мільйонів елементів, мільйонів зв'язків і взаємодій, потрібно навчитися описувати на множині рівнів її подання як частин, поєднаних в єдине ціле, які функціонують відповідно до потреб замовників. Не втратити увагу до жодного із тисяч людей – учасників процесу інтеграції: розроблення, виробництва та експлуатації. Необхідно врахувати різноманітні вимоги до аеродинаміки, технологій, організації виробництва, безпеки експлуатації, до економічної ефективності проєкту у цілому і до багатьох, багатьох його елементів.

Важливим напрямом робіт із подібними найскладнішими інженерними об'єктами є методологія системного підходу¹⁰. Найбільш істотне у цьому методі – **певний розумовий хід розгляду будь-якого багаторівневого об'єкта на різних рівнях його сутності у взаємозв'язку із вищестоящими та із нижчестоящими відносно нього елементами. Такий метод різнорівневих розумових компетенцій називається системним мисленням.**

*Системне мислення*¹¹ з'явилося як метод фокусування уваги дослідника на різних рівнях поділу цільового об'єкта на вищестоящі та на нижчестоящі по відношенню до нього елементи, які пов'язані між собою функціональним та (або) фізичним зв'язком.

⁹ БПЛА - безпілотний літальний апарат.

¹⁰ *Системний підхід* (System Approach) - напрямок методології наукового пізнання, в основі якого лежить розгляд об'єкта як системи: цілісного комплексу взаємопов'язаних елементів, а також сукупності взаємодіючих або сукупності сутностей та відносин.

¹¹ *Системне мислення* – розуміння функціонування системи, принципу зворотного зв'язку та факторів впливу на взаємодію системних елементів.

Залежно до поставленого завдання, вибирається необхідний рівень розгляду частин – цілих системи, у якому вирішується певна задача. Далі, формулюється на вищестоящих і нижчестоящих рівнях елементів – цілих систем, завдання, що розглядаються. При цьому, якщо з'являються або виявляються нові дані, використовується ітерація фокусування уваги. **Головна вимога цих процедур: розглянути всі частини, не втрачати із фокусу уваги ціле і, аналізуючи ціле, звертати увагу до частини.**

Слід пам'ятати, що основна особливість системного подання об'єктів у тому, що у *системах все перебуває у взаємозв'язку*. Ці взаємозв'язки формують **нові якості та властивості, відмінні** від властивих окремим системним елементам, та такі, *що складають* нові сутності. Елементи в *системі* поведуться інакше, ніж поза *системою*. Зокрема, відсік фюзеляжу поза фюзеляжем, є, якщо спрощено, просто частиною циліндричного виробу і, в основному, може сприймати осьове навантаження.

У складі фюзеляжу цей же елемент (відсік фюзеляжу) працює, сприймаючи внутрішній та зовнішній тиск, згинальні напруження, по суті, відповідає за герметичність салону, якщо це пасажирський літак (рис. 1.12). Це прояв так званих системних властивостей - *емерджентності*⁵. З погляду математиків та спеціалістів з міцності – фюзеляж, це лише сума конструктивних елементів, здатних витримувати задані навантаження, розрахованих на механічну міцність, із застосуванням, наприклад, методу скінчених елементів.

У той же час *системне мислення* дозволяє, фокусуючись на різних сутностях, взаємодіях різних *системних елементів*, розглядати і якість зовнішньої поверхні фюзеляжу, і

технологічність його складання, оцінювати витрати на проектування та виробництво, аналізувати та оцінювати постачальників матеріалів, вузлів та агрегатів. *Системне мислення* це не математичне, а алгоритмічне мислення, воно дозволяє «сканувати» фокусом уваги всю систему для досягнення поставленої мети та очікувань проєкту (рис. 1.13).

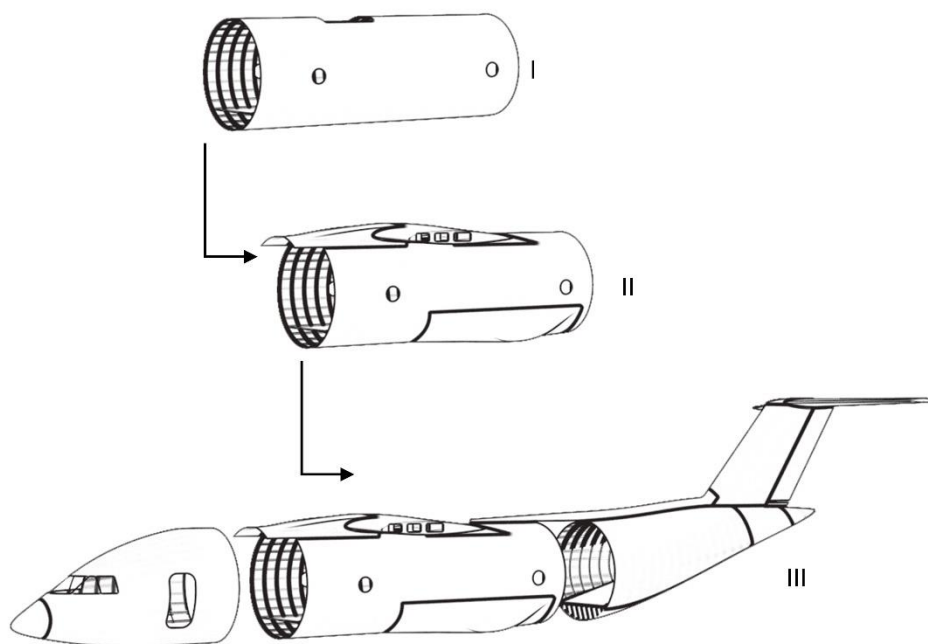


Рис. 1.12. Подання нової якості елемента – циліндричного відсіку, придбаного у складі фюзеляжу.

Системне мислення або методологія *системного підходу* передбачають під час аналізу ситуації та вибору рішень, постійне сканування за рівнями *системи* – по так званим «мега-системним переходам», перехід від частин до цілого, від цілого до частин. При цьому необхідне залучення до участі найрізноманітніших профільних фахівців: від інженерів, які

займаються міцністю та конструкторів до матеріалознавців, технологів і економістів.

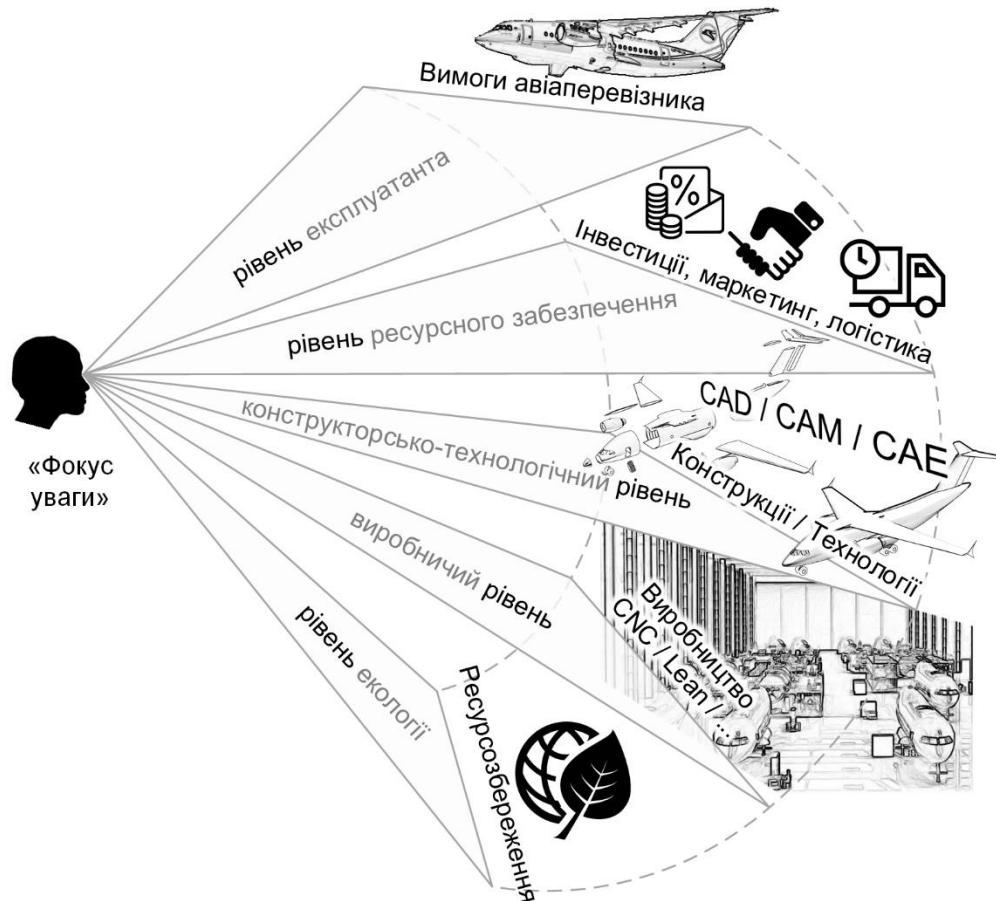


Рис. 1.13. Ілюстративно-образне подання нової якості елемента поза системою та в системі.

Різні питання, різні проблеми, іноді різні цілі у фахівців та різні ролі, які вони грають у цій *системній «грі»*.

Ще в 1974 Едсгер Вібе Дейкстра (Edsger Dijkstra) [11], ввів поняття розподілу інтересів, як спосіб спрощення подання складних об'єктів. Сутність цього способу в тому, що пропонувалося складну ситуацію розглядати та обговорювати із позиції різних ролей, фокусуючи увагу на якомусь одному

аспекті ситуації за один раз. Сьогодні такий спосіб мислення ще називають *«рекурсивним мисленням»* – сутність якого також **розбиття якоїсь складної проблеми на окремі елементи, які краще помітні і які можуть бути вирішені.**

Цей *рекурсивний*¹² *підхід* використовується на кожному *системному* рівні із їхньої множини. Оскільки однією із ключових властивостей *систем* є *емерджентність*, тоді, внаслідок цього, на кожному із наступних рівнів *системи* **починають проявлятися якісь її нові властивості, які також потрібно *рекурсивно* обговорювати і розглядати.**

Передбачається, що за рекурсивного підходу складність подання системи може бути зменшена за рахунок таких основних факторів:

- розподіл повного розгляду *системи* на розгляд окремих її елементів за різними системними рівнями. Оскільки кожен елемент *системи* завідомо простіший, ніж верхній за відношенням до нього *системний* елемент, тоді і розгляд спрощується. Крім цього, *система* в цілому та аналізований на даний момент фокусом зору окремий її елемент визначаються лише її вимогами – описом *системи*, як «чорної скриньки», коли ігнорується внутрішня її структура та структура її частин;
- розподіл повного розгляду кожної *системи* на розгляд її за допомогою множинних описів цієї системи (функціональний, конструктивний, просторовий, виробничий тощо) як «прозорого ящика», в якому аналізуються принципи організації взаємодії структур частин цієї системи. Тут же

¹² *Рекурсія* — визначення, опис, зображення будь-якого об'єкта чи процесу всередині цього об'єкта чи процесу, тобто ситуація, коли об'єкт є частиною себе.

можливе залучення інших методів опису змісту «прозорого ящика» з точністю, в принципі, достатньою для його виготовлення.

Фокусувати увагу, збираючи окремі *системи* у ціле, досягаючи *системного ефекту* – це найважливіший результат *системного підходу*. Цей підхід часом не доходить до деталей, залишаючи деталі та уточнення профільним фахівцям, у тому числі інженерам. Іноді цей підхід називається «**контрперфекціоністським**¹³».

Слід окремо зазначити, що *системний підхід* передбачає декілька варіантів розбиття (розчленування) *системи*, що розглядається, чи *об'єкта аналізу* на частини.

Можна розбивати на конструктивні елементи: агрегати планера літака (відсіки фюзеляжу, елементи крила, оперення, шасі), логічно розбивати на функціональні частини (агрегати, що працюють «на наддув», що працюють «на вигин», що сприймають акустичні навантаження тощо). Ці варіанти розбиття та аналізу за їх оцінюванні та узгодженні допомагають фокусувати увагу фахівців на окремих проблемах та уникнути багатьох помилок, знизити ризик на наступних етапах розвитку проєктів та системи в цілому.

1.2 Системна інженерія

Зі зростанням масштабів інновацій, різким ускладненням інженерних об'єктів, створюваних людиною, розширенням на нові регіони світу областей інженерної діяльності, підвищується ступінь відповідальності за результати інженерної діяльності,

¹³ *Перфекціонізм* (Perfection) – підхід до діяльності, який полягає в тому, що вдосконалення систем є тією метою, до якої має прагнути людина.

зростають складності вирішення науково-технічних, організаційно-управлінських проблем. Як ілюстрацію на рисунках 1.14 – 1.19 наведено найбільш характерні технологічні інновації, створені в ході розроблення деяких найвідоміших моделей літаків «Антонов».

Відповіддю на ці об'єктивні виклики стала поява в середині XX століття та бурхливий розвиток у наш час нової прикладної системної методології – *системної інженерії*.

Відомі численні визначення *системної інженерії*, наведемо найбільш типові:

- *Системна інженерія* – це міждисциплінарний підхід та спосіб забезпечення втілення успішності системи [13].
- Призначення *системної інженерії* полягає в тому, щоб керувати створенням складних систем [6].
- *Системна інженерія* – комплексний, мультидисциплінарний підхід та методика створення складних *систем*, виступає у якості фундаменту, на основі якого можна забезпечити та гарантовано підтримувати надійний стійкий зв'язок між місією, стратегічними цілями, конкретними завданнями та вимірними результатами інженерної діяльності [6].

Незважаючи на різницю у формулюваннях, всі вони про те саме.

Формулювання в сучасних міжнародних стандартах ISO/IEC/IEEE 24765:2010 [14], ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2] визначають *системну інженерію*, як **міждисциплінарний підхід, що управляє повним технічним та організаторським зусиллям, необхідним для перетворення низки потреб зацікавлених сторін, очікувань та обмежень у рішення та для підтримки цього рішення протягом його життя.**

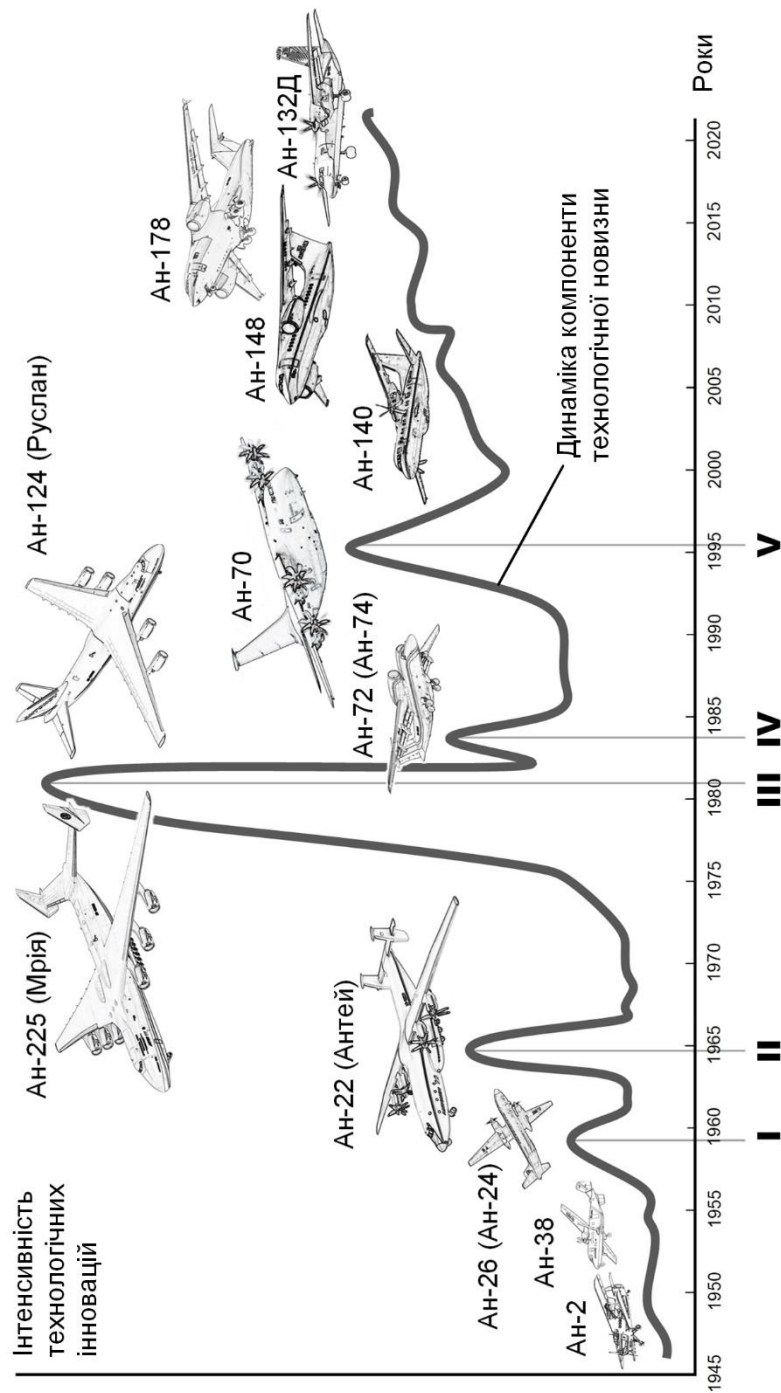


Рис. 1.14. Хвилі інтенсивності технологічних інновацій (I, II, III, IV, V) на прикладі лінійки транспортних літаків «Антонов» [12].

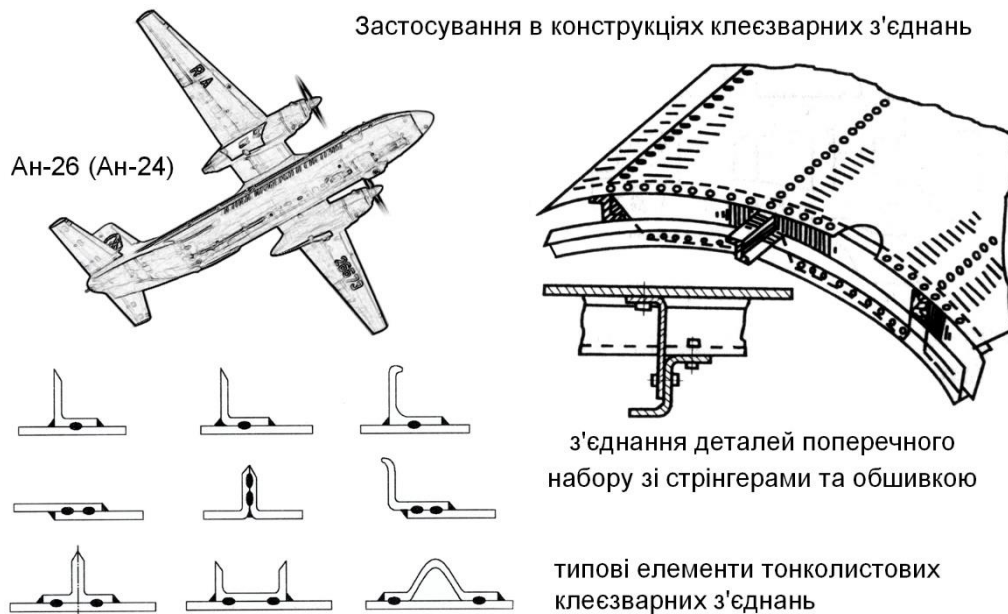


Рис. 1.15. Літак Ан-26 – I-а хвиля технологічних інновацій [12].

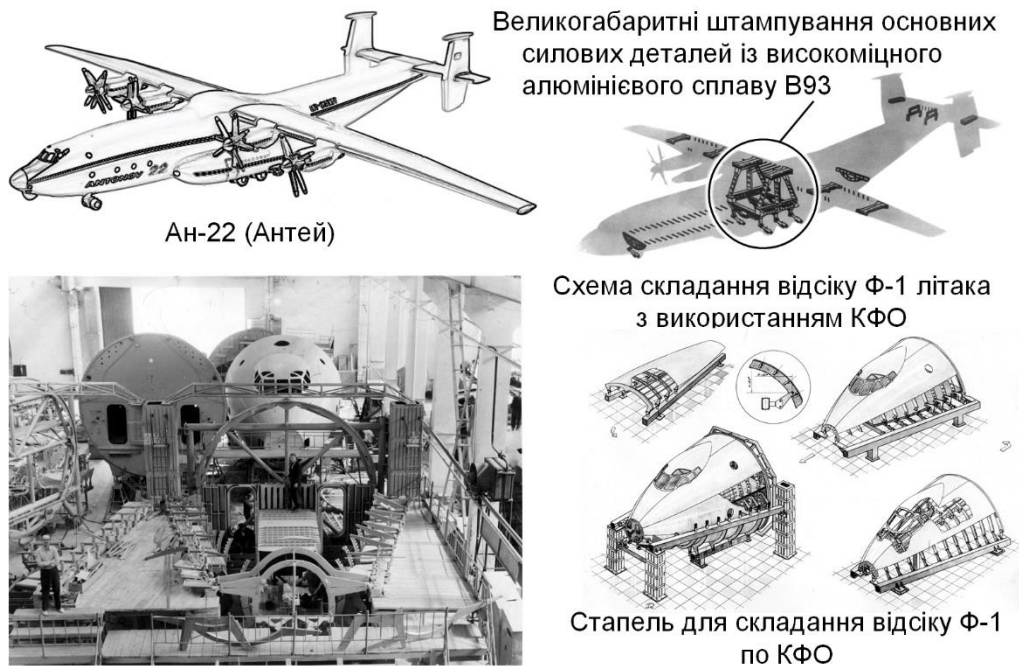
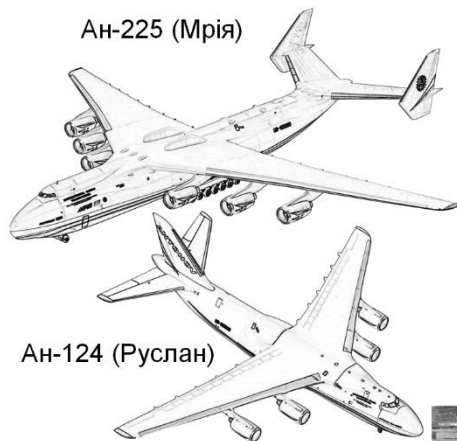
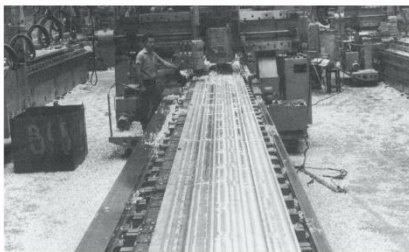


Рис. 1.16. Літак Ан-22 «Антей» – II-а хвиля технологічних інновацій [12].



- Масове застосування композиційних матеріалів
- Технологія виготовлення заготовок, механообробка унікальних довгомірних (до 28 м) пресованих панелей крила та виготовлення великогабаритних штампувань, що виготовляються на унікальному устаткуванні (зусилля преса до 70 т) для силової каркасної конструкції фюзеляжу літака



Технологічний комплекс виготовлення довгомірних панелей та поясів лонжеронів крила із пресованих напівфабрикатів



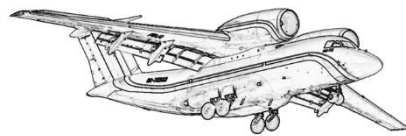
Стапель складання крила літака Ан-124

Рис. 1.17. Літаки Ан-124 «Руслан», Ан-225 «Мрія» – III-а хвиля технологічних інновацій [12].

Іншими словами, *системна інженерія* – це керівництво створенням складних систем, які успішно вирішують актуальні для користувачів проблеми за допомогою **междисциплінарних підходів**.

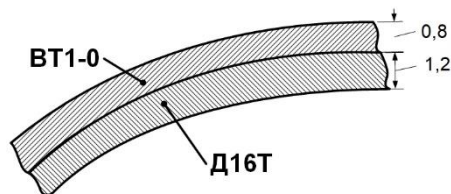
Крім того, пропонується замість терміну «міждисциплінарних підходів» використовувати термін «**трансдисциплінарних підходів**», який більш точно виражає сутність участі системного інженера: «транс» – це «над», а не «між дисциплінами». З наведених визначень слідує, що *системна інженерія* відрізняється від традиційних інженерних

дисциплін своїм предметом, яким є використання вузькопредметних компетенцій на вирішення окремих спеціалізованих завдань.



Ан-72 (Ан-74)

- Застосування біметалічних матеріалів у обшивках: використання у обшивках (у нижніх частинах обшивок фюзеляжу) шаруватих композиційних металевих матеріалів Al-Ti



- Масове застосування композиційних матеріалів:
 - обшивка великої ступки головного шасі;
 - обшивка ступки вантажолука;
 - експлуатаційна панель крила;
 - панель дослідного відсіку фюзеляжу тощо
- Технологія виготовлення тяг управління із труб алюмінієвого сплаву Д16Т методом гарячого деформування

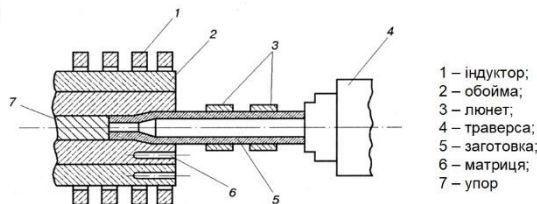
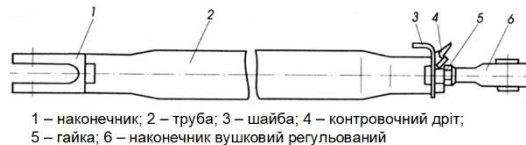


Рис. 1.18. Літак Ан-72 (74) – IV-а хвиля технологічних інновацій [12].

Приклад. Інженер-механік, залежно від спеціалізації, здійснює вибір технології оброблення матеріалу, інженер-електрик або електронник проектує або експлуатує електричні або електронні модулі в машинобудівній системі, інженер-програміст формулює цифрові, програмні інтерфейси між електромеханічними, гідро-, електро-, пневматичними елементами системи.

Слід зазначити основні особливості спеціалізації *системної інженерії*:

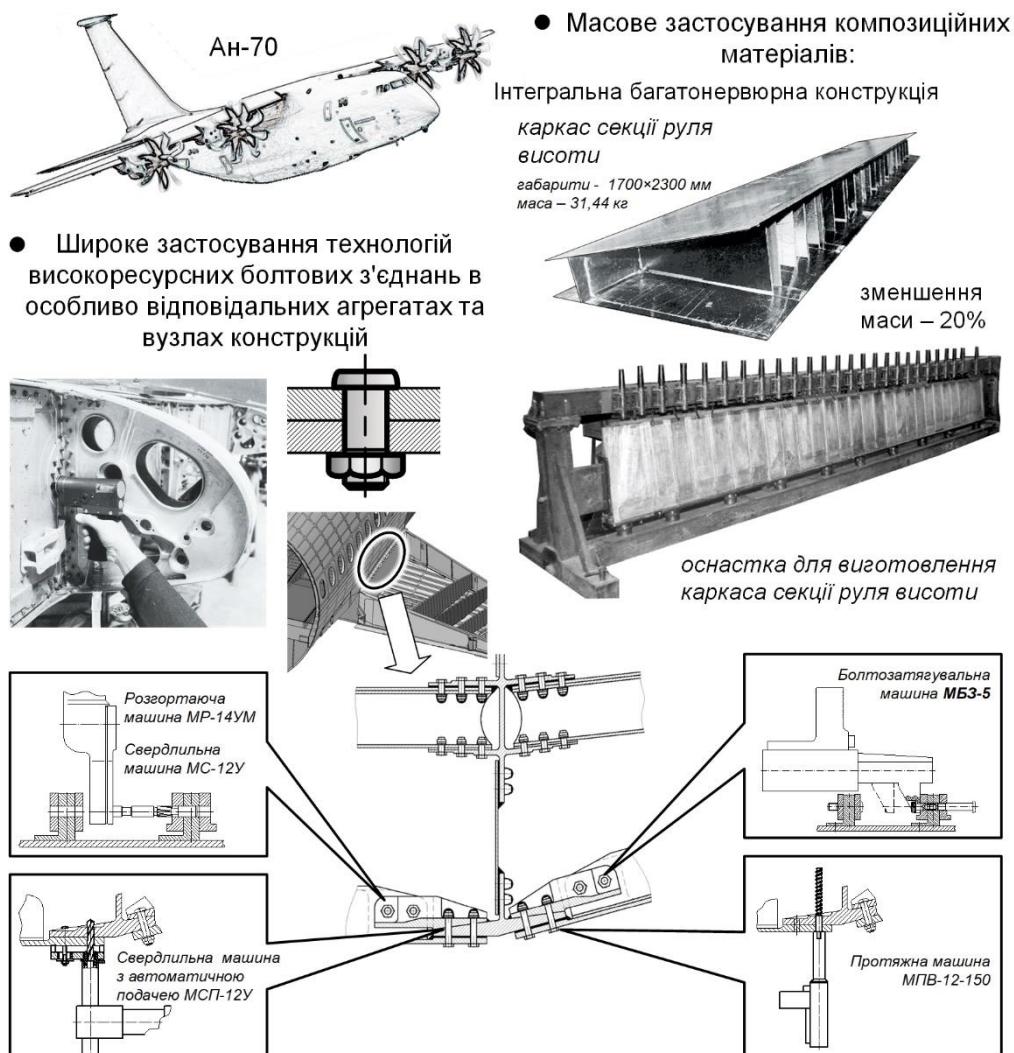


Рис. 1.19. Літак Ан-70 – V-а хвиля технологічних інновацій [12].

- **По-перше**, об'єкт системної інженерії розглядається як цілісна *система*, в оточенні та у складі формуючих його *систем* та *підсистем*. Системний інженер зобов'язаний враховувати не лише технічні параметри функціонування *системи* та її *підсистем*, але також виявляти та враховувати потреби замовників, особливо щодо експлуатації та обслуговування. Тобто системний інженер має розглядати

розроблювану *систему* у оточенні інших *систем*. Всі ці фактори мають бути враховані, регламентовані, документовані та відстежені у процесі створення *системи*.

- **По-друге**, хоча основне завдання системного інженера керувати створенням системи, він сам часто безпосередньо бере участь у найважливіших проєктних процесах. На основі свого досвіду, на основі апріорної, часом недостатньої інформації, він зобов'язаний приймати основні проєктні рішення.
- **По-третє**, системний інженер, відповідаючи за всю *систему* в цілому, зобов'язаний відстежувати та координувати розробку інших її елементів та *підсистем*, а також фізичні та функціональні інтерфейси їхньої взаємодії.

Приклад. Уявіть собі, що буде, якщо головний конструктор літака «XXX» не відстежуватиме створення для нього двигуна, який входить до зони відповідальності головного конструктора двигуна. Проєкт – «система» літак «XXX» не відбудеться, або не встигне відбутися до терміну затребуваності його ринком.

Уявімо, що буде (і це навіть спостерігалось на прикладі гіганта європейського цивільного авіабудування А-380), якщо системним інженером – головним конструктором та керівником проєкту не будуть належним чином враховані світові тренди пасажиропотоків у найбільших хабах світу. Окупність проєкту А-380 не була досягнута, проєкт виявився збитковим, збиток істотним.

• Системи, що створюються системними інженерами

Спеціалізація *системного* інженера особливо потрібна, коли створюються *складні інженерні системи*. Очевидно, щоб розробити електровелосипед чи моторолер особливої потреби у *системному* інженері немає. Технічний керівник проєкту –

провідний спеціаліст, як правило, багато в чому спираючись на минулий досвід, цілком зможе справитися із цією роботою. **Системний інженер потрібний там, де створюється щось нове, з новими технологіями, новими функціями, новою якістю.**

Система, де необхідна участь системного інженера, має такі особливості (ознаки):

- значний обсяг складних конструктивних елементів, застосування принципово нових технологій (наприклад, формоутворення конструкцій із композитних матеріалів методом пултрузії¹⁴, можливі специфічні вимоги до експлуатації *систем* (вертикальний зліт, короткий пробіг тощо), що потребують спеціальних інженерних компетенцій;
- висока різноманітність компонентів *системи* з різними типами інтерфейсів, що вимагають мультидисциплінарного підходу, складних взаємодій під час створення, спеціальних методів випробувань та верифікації;
- використання нових та новітніх технологій у тих *системних елементах* та *підсистемах*, які відповідають за досягнення основних функціональних властивостей системи цілком.

Приклад. Використання композитних технологій у виробництві крила та фюзеляжу нових цивільних літаків: Airbus A380, Airbus A350, Boeing 777, Boeing 787 Dreamliner та інших.

Якщо *інженерна система* володіє якимись вищевказаними ознаками або хоча б одним з них, вона іноді називається **складною інженерно-насиченою системою** і тоді потребує участі в її створенні *системних інженерів* [6].

¹⁴ Метод «пултрузії» – технологія формування та затвердіння просочених полімерним сполучним волокон стрижня протяжкою через систему фільтр із перетином, який поступово зменшується.

• Етапи розвитку системної інженерії

Прийнято виділяти два великі етапи розвитку *системної інженерії* (рис. 1.20). Перший етап – з 40-50-х років і до 90-х років минулого століття, який називають періодом *становлення системної інженерії*. Другий – називається етапом *координації*, він продовжується і сьогодні. Ця галузь знань активно розширюється та розвивається. Потреба формується все новими викликами розвитку прогресу, появою та ускладненням нових *складних інженерних систем*.

Вважається¹⁵, що у першому із згаданих часових періодів увагу дослідників було зосереджено на створенні методів боротьби із дедалі більшою складністю інженерно-технічних об'єктів. У 1957 році Г. Гуд (Harry H. Good) і Р. Макол (Robert E. Machol) [15], у якості основної проблеми, що стояла перед інженерами на той період, виділили **зростаючу складність створюваних технічних систем і визначили системну інженерію, як системний метод проєктування технічних компонент цих складних об'єктів**. Як ефективний інструментарій пропонувалося використовувати **математичну статистику, дискретну математику і теорію ігор**.

А у якості **важливої особливості** відзначалася **необхідність скоординованої роботи фахівців різних профілів діяльності та спеціалізацій**.

В 1962 А. Холл (Arthur David Hall III) [16] сформулював ряд ідей, які можна вважати **методологічними основами системної інженерії** і які зберігають актуальність в наші дні:

¹⁵ У передмові [4] «Від редактора російського видання», складений Батовріним В.К., наведена аналітика формування системної інженерії як важливого розділу інженерної діяльності. Далі наведуться відомості із цього матеріалу.

- **Перша основа** – *багатоаспектна діяльність*.
- **Друга основа** – найважливішою роллю *системного* інженера є виявлення *функціональних кордонів* між людськими інтересами, самою системою та її багатоаспектним оточенням. У цьому оточенні слід виявити три складові цього оточення:
 - фізичну та технічну;
 - ділову та економічну;
 - соціальну.
- **Третя основа** (без сумніву, ще більш актуальна в наш час) – до кола інтересів *системної* інженерії обов'язково включається дослідження потреб ринку, виявлення сьогоденних та прогноз найближчих, а також, можливо, і подальших тенденцій розвитку ринкових потреб.
 Вже на межі кінця 60-х, на початку 70-х років дослідниками були сформульовані такі **основні постулати**, які й сьогодні є основоположними у розумінні завдань *системної* інженерії:
 - необхідність обґрунтування створення *системи*;
 - обов'язковість розгляду *альтернативних* рішень;
 - формулювання *критеріїв* відбору та вибір найкращих альтернатив;
 - проведення *синтезу* системи, перевірка відповідності результатів її тестування.

Г. Честнат [17] так сформулював одне із стрижневих питань сьогоденного розуміння ролі *системного* інженера. Спочатку - це забезпечення комплексного підходу, який включає широкий розгляд різних варіантів та методів досягнення необхідного результату. Потім вибір *системи* із можливих варіантів за критеріями вкладу окремих компонентів *системи* в їхній

загальний підсумковий результат. У тій же роботі [17] вперше була сформульована необхідність аналізу всіх категорій майбутніх користувачів системи і таким чином було закладено основи сучасної *інженерії вимог*.

Вже в ті роки стали розвиватися два ключові підходи, які сьогодні є стрижнем розуміння *методології системної інженерії*. Йдеться про *системний підхід* і *поняття життєвого циклу системи*. У 1971 році в Каліфорнійському технологічному інституті вперше був прочитаний цикл лекцій «**Системні концепції для приватного та державних секторів**». Починаючи з них, *системний підхід* і *системне мислення* стали визнавати **першоосною інженерної діяльності під час створення складних інженерних систем**. С. Рамо [18], який згодом став одним із керівників космічного проекту «Аполлон», **сформулював 6 основних кроків**, які конкретизують дії керівника в рамках *системного підходу* стосовно інженерної діяльності:

- визначення мети функціонування *системи* або опису проблеми, для вирішення якої вона створюється;
- розроблення *вимог* та *критеріїв* відповідності їм;
- здійснення *синтезу* системних рішень;
- *аналіз* результатів цього синтезу;
- *вибір* системи;
- *реалізація* цієї системи.

Певним підсумком періоду становлення *системної інженерії*, як спеціальної галузі знань, став розвиток та узагальнення ідеї А. Холла щодо використання стосовно створення *систем* підходу з позиції *життєвого циклу*. При цьому Б. Бланчард і У. Фабрицький [19] вперше запропонували використовувати

поняття *життєвого циклу систем* як загальну, рамкову організаційну основу інженерного мислення.

Вважається, що починаючи з середини 90-х років минулого століття, закінчився етап *становлення* і почався етап *координації системної інженерії*. На той час, вважають, прийшло усвідомлення важливості включення до методологічної основи питань **розробки складних систем управлінської складової їх створення**. Тоді Е. Сейдж (Andrew Sage) [20] запропонував та обґрунтував ефективність використання *системної інженерії*, як **спеціальної технології управління створенням складних систем**, що фокусується на контролі процесів повного життєвого циклу та передбачає визначення, розроблення та застосування економічно ефективних високоякісних та надійних систем.

За наступні десятиліття і в наш час все більше зміцнювалося усвідомлення того, що в основі створення *складних інженерних систем* лежить колективна діяльність, яка координується та керується *системними інженерами*, тобто керована з позиції розвитку *життєвого циклу систем*. Дедалі більше зміцнюється уявлення про пріоритетність **управляючої компоненти проти технічної складової**.

- **Системна інженерія та управління проектами**

Спонукальних *мотивів* для розроблення нових *складних систем* може бути декілька.

Для оборонних та подібних до них *систем*, створення яких фінансується з бюджетних джерел – це потреба користувача – міністерства оборони, інших силових відомств, будь-яких органів влади або уповноважених ними структур.

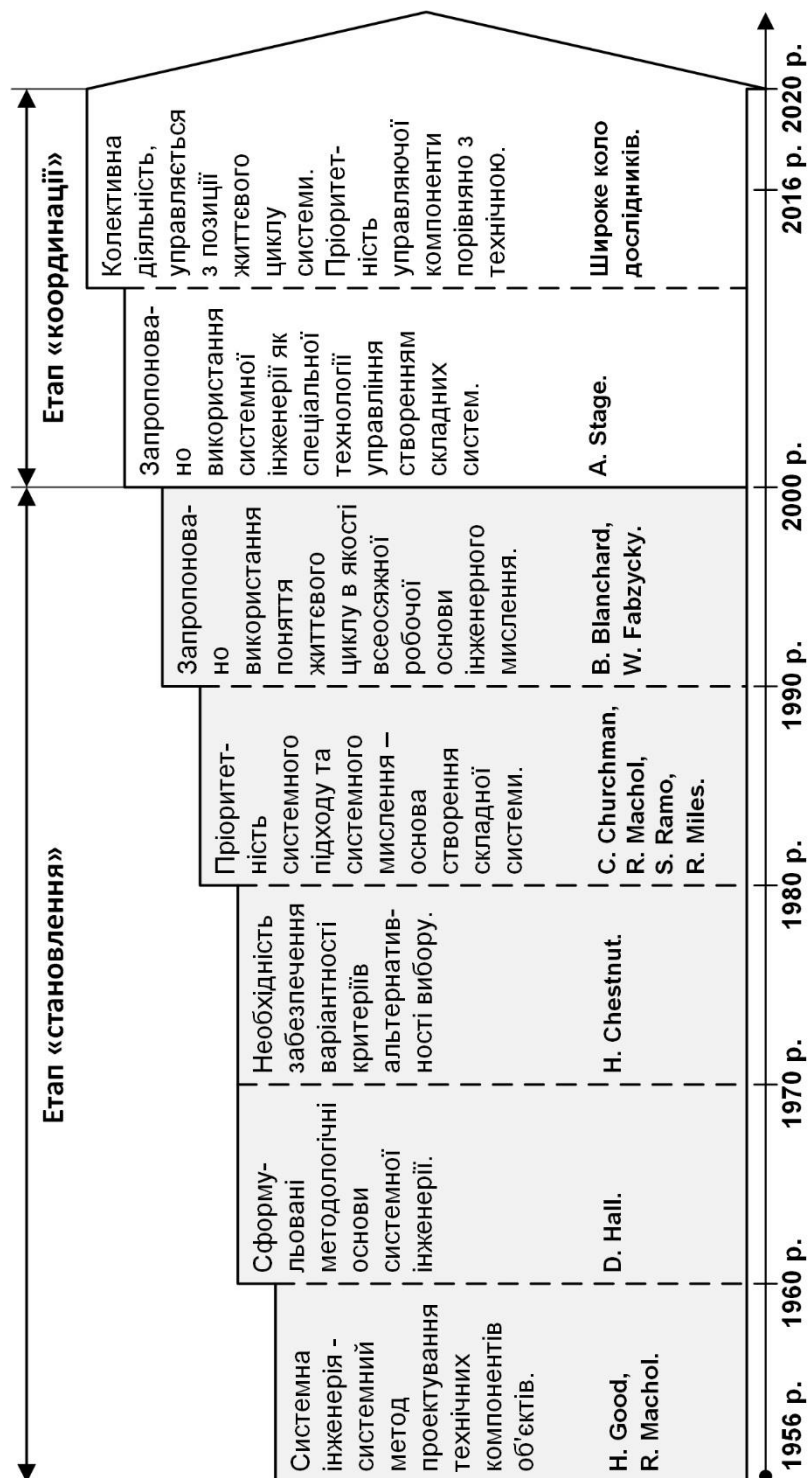


Рис. 1.20. Два етапи та основні періоди становлення та розвитку системної інженерії.

Для цивільних, комерційних систем це, як правило, задоволення нової потреби, виявленої або прогнозованої маркетологами, а також поява нової технологічної можливості, що створює передумови перемоги у конкурентній боротьбі за рахунок створення нових функцій або скорочення виробничих та інших витрат у разі створення системи.

У першому із наведених мотивів **потреба** вважається сформульованою та формалізується у вигляді системи вимог до майбутньої *складної системи*. Після цього потенційні виконавці, їх, як правило, не менше двох, виконують попередні роботи з аналізу рішень стосовно застосовних у системі матеріалів; розробляють пропозиції щодо розроблення нових матеріалів, пропозиції щодо розроблення нових технологій. Такий порядок, наприклад, передбачений у моделі керівництва закупівлями Міністерства оборони США – DoD Instruction 5000 (рис. 1.21) [6, 21].

У другому випадку для цивільних, комерційних систем міжнародним стандартом ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2] передбачені наступні дві групи дій, які називаються у стандарті процесами, що передують роботі із можливого створення майбутньої нової *системи* (рис. 1.22).

Це спочатку аналіз потреб бізнесу, який має визначити проблеми бізнесу, оцінити наявні можливості, охарактеризувати область можливих рішень і виявити із них ті рішення, які можуть вирішити насущну проблему бізнесу.

Потім друга група робіт або процесів, пов'язана із визначенням потреб та вимог зацікавленої (або зацікавлених) сторін, щоб сформулювати вимоги до майбутньої системи.

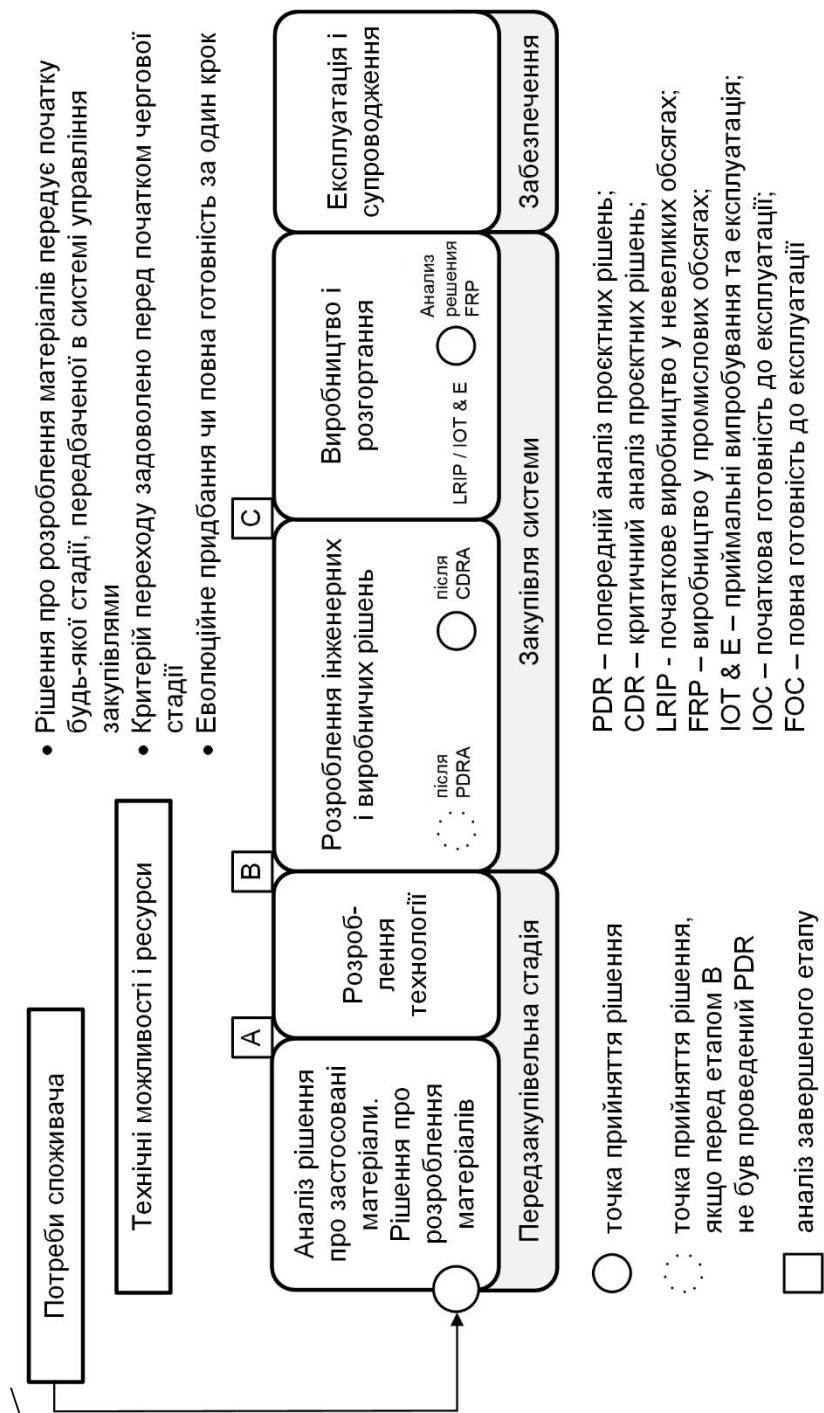


Рис. 1.21. Модель керівництва придбанням Міністерства оборони США [6, 21].

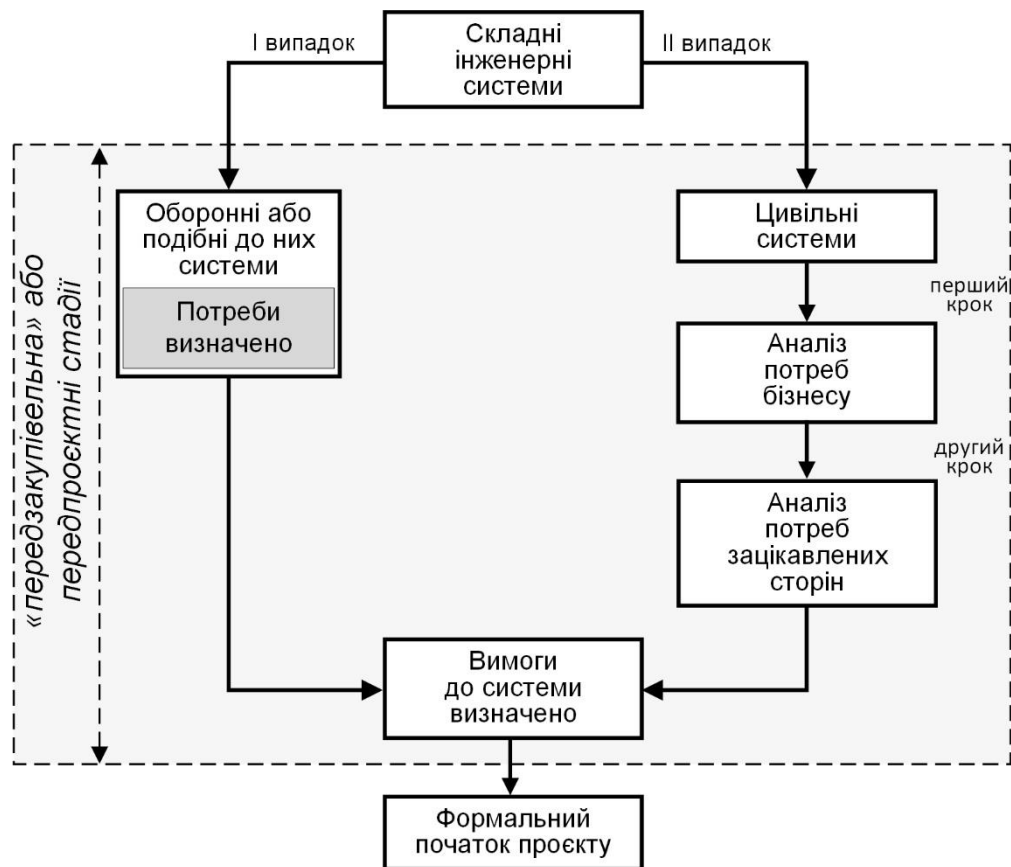


Рис. 1.22. Два типові випадки активації формального початку проєкту.

У першому випадку (рис. 1.22) рішення про старт робіт можливий майбутній розробник системи може прийняти після формальної публікації «запиту» структурою, яка ініціює такий «запит», найчастіше у формі RFP (Request for Proposal).

У другому випадку (рис. 1.22), майбутній розробник системи сам, виходячи зі стратегії розвитку організації, аналізу потреб ринку та оцінки своїх можливостей, ініціює початок робіт з перших двох кроків можливого майбутнього проєкту створення нової складної інженерної системи. Дуже часто формальному старту роботи за проєктом створення нової складної системи

передують дослідницька, аналітична, експертна робота, за своєю сутністю малоформалізуєма, коли ще немає сформульованої організаційної структури, яка могла би організувати виконання проекту розробки системи, коли не уточнені цілі функціонування системи, або вони носять розпливчастий характер, коли немає погодженого графіка робіт.

Тим не менш, вже тоді ясний ймовірний підсумок цього етапу робіт – ґрунтуючись на оцінці існування потреби в новій системі та попередньої оцінки здійсненості її створення, можна визначити, хоч і дуже укрупнено, розмір ресурсів, необхідних для такого придбання, а також виправданість витрат цих ресурсів. Головне визначити, чи існує ринок для майбутньої системи та який його обсяг, оскільки виходячи з цього можна оцінювати адекватність можливих витрат, які потрібні для розроблення нової *системи*.

Всі перелічені вище процеси, що передують можливим майбутнім роботам зі створення *системи*, виконуються, як правило, невеликою групою фахівців, серед яких обов'язково має бути системний інженер, а також фахівці з організації робіт проекту, маркетологи. Часто ці роботи виконуються поза формальною організованою структурою. Як показує практика, понад дві третини роботи цієї, так званої, «передпроектної» стадії не мають продовження.

У разі, коли приймається рішення стосовно розгортання робіт зі створення нової *складної системи*, масштаб і складність майбутніх робіт вимагають формування спеціальної групи людей, завданням яких буде управління роботами зі створення нової системи, відстеження термінів, координація дій учасників, контроль бюджету тощо. Такі дії називаються «управлінням

проєктом» створення нової *системи*, сам захід називають «проєктом». Призначається керівник проєкту та затверджується склад проєктної групи, яка називається «командою проєкту». Детально дії та процедури управління проєктом визначені в міжнародному стандарті ISO 21500:2021 [22], а також у «зведенні знань з управління проєктами» PMBOK (Project Management Body Of Knowledge, 6 видання [23]).

Системна інженерія, очевидно, є невід'ємною частиною робіт проєкту створення *складної системи*. У термінології управління проєктами така система називається «продуктом» або «послугою». *Системна інженерія* пов'язана із керівництвом власне інженерними роботами розглянутого проєкту: визначення та досягнення функцій *системи*, відповідності її цілям, координацією робіт з «постачальниками», які мають забезпечити виконання функцій своїх частин *підсистем* нової *системи*. У рамках системної інженерії відстежується перебіг інженерних робіт, здійснюється його коригування, забезпечується отримання запланованих показників функціонування створюваної системи.

Керуючими проєктом створення *системи* забезпечуються планування та контроль робіт проєкту, планування та контроль термінів, фінансів, договірних зобов'язань загалом, ризиків проєкту, організації системи якості робіт у проєкті.

На рисунку 1.23 наведена так звана діаграма Венна, що демонструє області взаємодії функцій *системної інженерії* та *управління проєктом* у взаємодії із загальною системою менеджменту організації, що реалізує *проєкт* системи, що розглядається, та *проєкти* ще якихось *складних інженерних систем*. Отже, очевидно, що у зоні функцій *управління*

проєктом перебуває і функціонал спеціалізації *системної інженерії*.

Область *управління проєктом* включає дві складові: перша – *системна інженерія*, друга – *планування та контроль проєкту*. Технічне керівництво знаходиться у функціоналі *системної інженерії*. Керівництво програмою, фінанси, терміни, договори з підрядниками – у складі планування та контролю **проєкту**. Постановка завдань, управління ризиками, взаємодія із замовниками – за своїми компетенціями у **зоні спільної відповідальності**.

У якості ілюстрації на рисунку 1.24 показано використане в 2008 році в роботах Українського НДІ авіаційної технології подання зіставлення процесів проєктного управління та системної інженерії на загальній тимчасовій шкалі.

У якості ілюстрації на рисунку 1.25 наведена кореляція типових фаз, контрольних подій, авіабудівної програми (проєкту) до відповідних їм стадій життєвого циклу.

У якості прикладу на рисунку 1.26 показано одне з типових в авіабудуванні співвідношень основних етапів проєктного управління (ліва графа) і системної інженерії (права графа) літакобудівної програми. На рисунку 1.27 – те саме співвідношення у видозміненій формі.

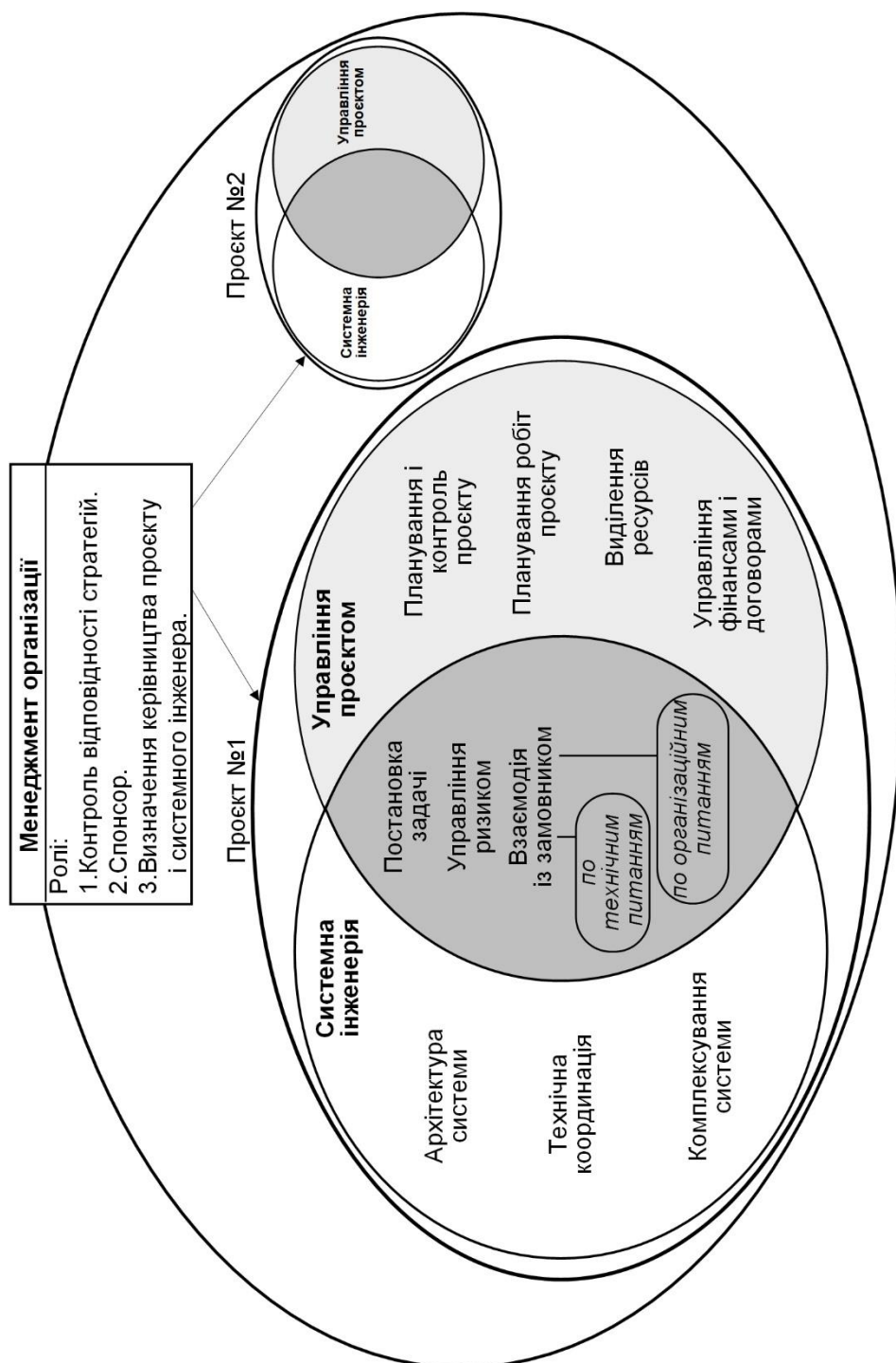


Рис. 1.23. Взаємозв'язок функцій управління проектом та системної інженерії.

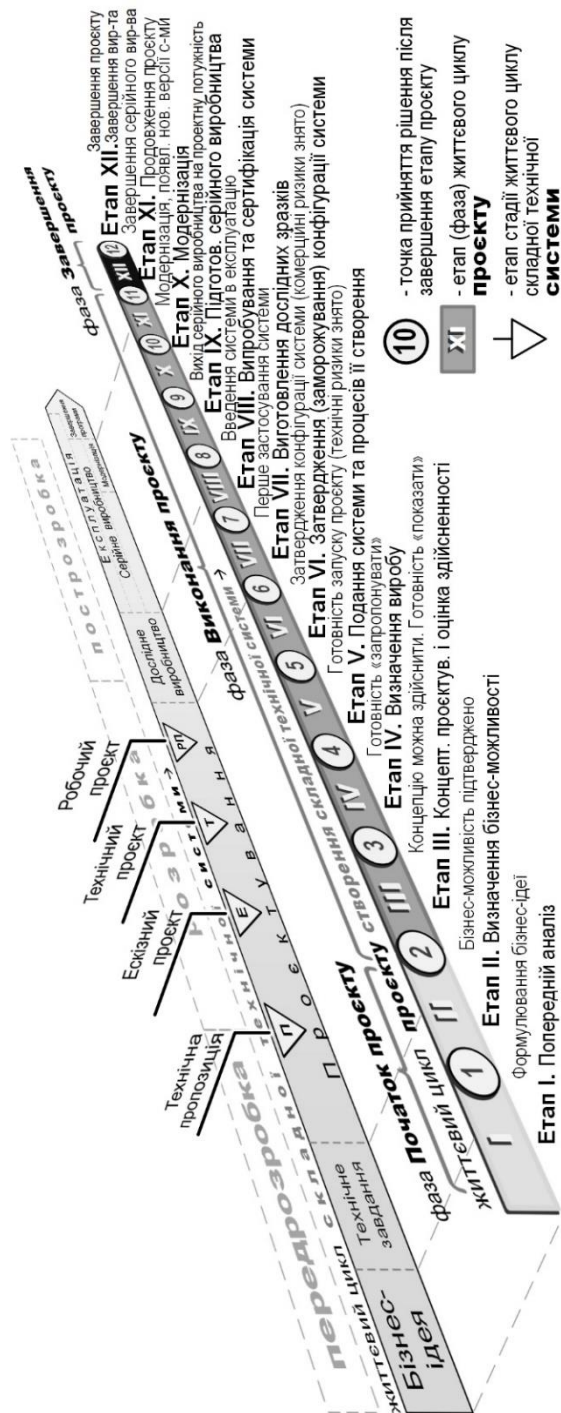


Рис. 1.24. Подання життєвого циклу: умовне зіставлення функцій управління проектом створенням літака з функціями системної інженерії..

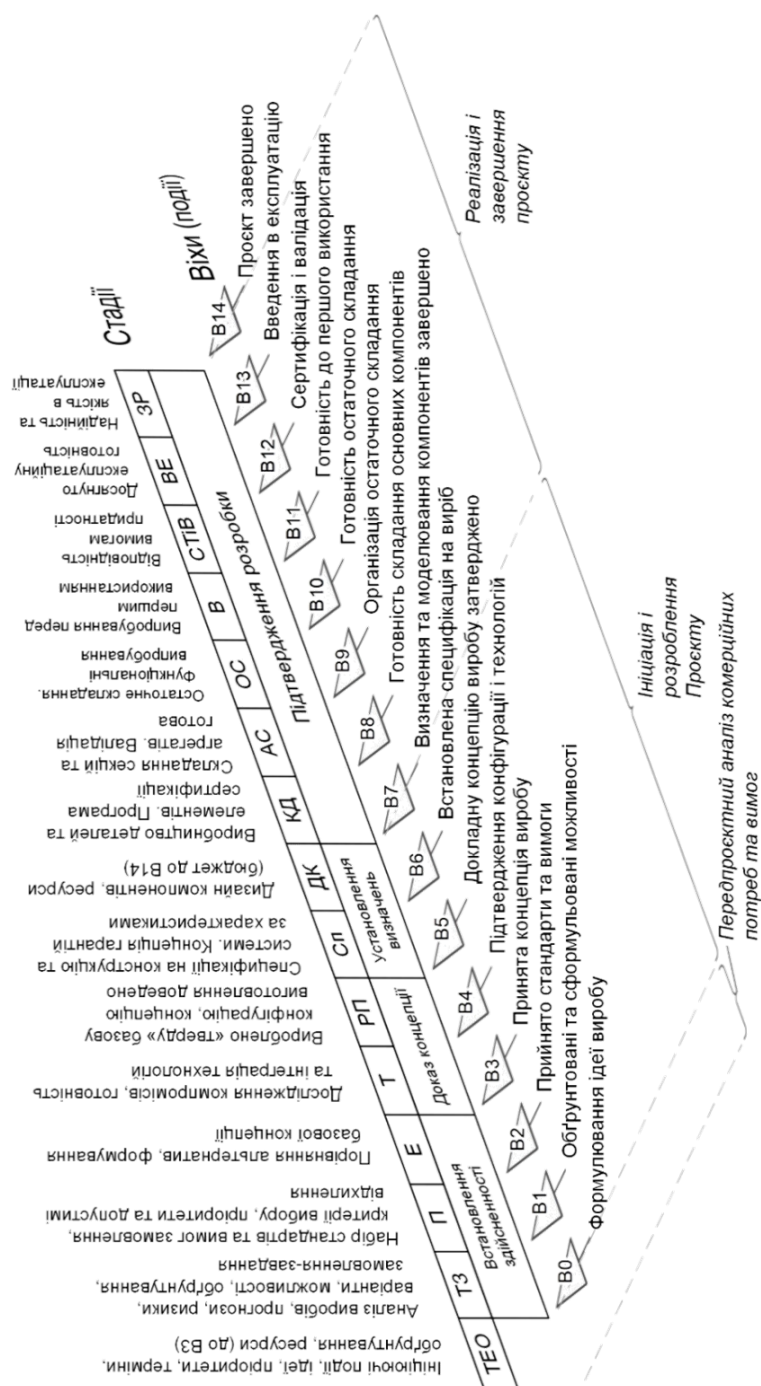


Рис. 1.27. Модель життєвого циклу процесу розроблення нового виробу – стадії розроблення та віхи B0 ... B14 (контрольні події) проекту розробки:

ТЕО – техніко-економічне обґрунтування; Т3 – технічне завдання; П – технічна пропозиція; Е-експертний проект; Т – технічний проект; РП – робочий проект; Сл – специфікації; ДК - конструювання компонентів виробу; КД - Конструювання деталей; АС – агрегатне складання; ОС – остаточне складання; І – випробування виробу; СТІВ - сертифікація та валідація; ВЕ - введення в експлуатацію; ЗР – завершення розробки (мету Проекту досягнуто).

• Нормативні публічні документи системної інженерії

Враховуючи тісний зв'язок системної інженерії із практичними завданнями, фахівці завжди приділяють велику увагу розробленню нормативно-методичних матеріалів, присвячених цій проблемі. Вважається, що, ймовірно, одним із базових нормативних документів із системної інженерії стало Керівництво «375-5» (AFSC Manual 375-5), опубліковане в 1966 році, розроблене за підтримки ВПС США [25]. У цьому Керівництві вперше були описані регламенти, пов'язані із поданням основних деталей розроблення *систем*. Примітно, що це документ постійно розвивався, згодом перетворився на військовий стандарт MIL-STD-499 [26]. Вже в 90-х роках була розроблена його версія MIL-STD 499B [27], яка, як наголошують фахівці, багато в чому стала основою найважливіших сучасних нормативних та публічних документів в області *системної інженерії*: ANSI/EIA 632 [26], ISO/IEC 26702:2007 [29], ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2]. Слід зазначити, що в СРСР прообразом MIL-STD 499 із певною часткою умовності можна вважати серію ГОСТів «В» (ГОСТ В 15.208-82 [30]) та їхніх попередників, які описують систему розроблення та поставлення на виробництво військової техніки.

У згаданому військовому стандарті США подавалися рекомендації стосовно опису процесів розроблення *систем*, управління їх створенням у тісній координації зі сформульованим планом управління завданнями *системної інженерії*. У цьому документі, як відзначають багато авторів, вперше було зафіксовано найважливіші смислові поняття *системної інженерії*, які з невеликими трансформаціями

використовуються у багатьох сучасних стандартах, серед них такі:

- *Система* – інтегрована сукупність персоналу, продуктів, процесів, що володіє здатністю до задоволення встановлених потреб або досягнення цілей;
- Елемент *системи* – базова структура, складова системи, яка задовольняє одній із декількох вимог, пов'язаних із нижчестоящими рівнями елементів *системи*;
- Ключові функції – важливі роботи, компетенції, дії, що гарантують можливість забезпечення потреб клієнта упродовж повного життєвого циклу системи.

З кінця 80-х років почало формуватися прогресивне середовище *системної інженерії*. Кількість її учасників постійно розширювалася за рахунок високотехнологічних цивільних галузей виробництва. Альянсом підприємств електронної промисловості було розроблено стандарт ANSI/EIA 632 [28]. В його основу були покладені вимоги користувачів щодо функціонування *системи*. Процеси *системної інженерії* виділялися як основа для розроблення машин і механізмів, які реалізують підфункції цієї системи. У цій роботі брав участь альянс галузей електронної промисловості (EIA). Остання редакція цього стандарту була розроблена у співпраці із Американським національним інститутом стандартів (ANSI) [6, 28]. Наразі найважливішою віхою у розвитку та практичному використанні методології *системної інженерії* є комплекс стандартів у цій області, розроблений Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO), Міжнародною електротехнічною комісією (IEC) за участю багатьох

некомерційних професійних організацій, товариств та об'єднань.

У складі цього комплексу стандартів ключове місце належить міжнародному стандарту ISO/IEC/IEEE 15288:2015 «Systems and software engineering – System life cycle processes» [2]. Нещодавно в Україні запроваджено національну версію цього стандарту ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016 «Інженерія систем та програмного забезпечення. Процеси життєвого циклу систем (ISO/IEC/IEEE 15288:2015, IDT)» [1], а також стандарт ISO/IEC/IEEE 12207:2017 «Systems and software engineering — Software life cycle processes» [31]. Цей комплекс взаємопов'язаних нормативних документів включає стандарти, що регламентують якість та зрілість процесів подання архітектури систем, та низку інших.

Важливими для розвитку системної інженерії є загальновизнані міжнародні стандарти:

- Стандарт ISO/IEC/IEEE 42010:2011 «Systems and software engineering — Architecture description» [32], в якому представлено множинність зв'язаних описів об'єктів, які існують у різних інформаційних системах;
- Стандарт OMG Essence (Kernel and Language for Software Engineering Methods) 1.2:2018 [33], яким узагальнюються процеси від програмної до системної інженерії;
- Стандарт IEC 81346-1:2009 «Industrial systems, installations and equipment and industrial products — Structuring principles and reference designations» [34] – стандарт поділяє функціональний, проєктний та локальний опис, може використовуватися як основа управління конфігурацією, задаючи принципи кодування систем та їх частин;

- Стандарт ISO 15926-1:2004 «Industrial automation systems and integration — Integration of life-cycle data for process plants including oil and gas production facilities» [35] – дозволяє виконувати інтеграцію даних різних інформаційних систем життєвого циклу інженерних об'єктів;
- Публічний документ The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) [13] надає розгорнуте уявлення успішної системи та багато інших визначень системного підходу.

Окремо слід виділити нормативні документи, розроблені в рамках НАТО, які стосуються подання систем та їх життєвих циклів:

- Стандарт AAP-20:2015 NATO Programme Management Framework (NATO Life Cycle Model) [36];
- Стандарт AA-48:2019 NATO System Life Cycle Processes [37].

Останніми роками особлива увага фокусується на розробленні нормативних документів у сфері оцінки вартості життєвого циклу оборонних систем, їх структури: Research and Technology Organization (RTO):

- RTO-TR-SAS-069, Code of Practice for Life Cycle Costing [38];
- RTO-TR-SAS-076, NATO Independent Cost Estimating and the Role of Life Cycle Cost Analysis in Managing the Defence Enterprise [39].

Зазначимо також, що останні роки, окрім цих загальновизнаних нормативних документів з системної інженерії, подібні галузеві, асоціативні документи розроблені і продовжують розроблятися провідними продуцентами наукоємної продукції та асоціацій, що їх об'єднують: Airbus, Boeing, FAA, IEEE, ITS, NASA, ANSI.

В Україні введені в дію на національному рівні деякі із найвідоміших нормативів в області системної інженерії, це вже згаданий вище аналог: ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2] – ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016 [1] та ГОСТ В 15.004-84 «Система розробки та постановки на виробництво військової техніки. Стадії життєвого циклу виробів та матеріалів» [40] – ДСТУ В-П 15.004:2019 «Система розроблення та постачання на виробництво озброєння та військової техніки. Стадії життєвого циклу озброєння та військової техніки» [41], а також низка інших національних стандартів, які є відтворенням міжнародних стандартів системи ISO, що регламентують різні аспекти життєдіяльності систем.

1.3 Підсумки

• Що таке «система»?

Із розглянутих визначень поняття *системи* натеper найбільш загальноприйнятим є визначення, наведене в міжнародному стандарті ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2]: *Система* — **це поєднання взаємодіючих елементів, організованих для досягнення однієї чи кількох цілей**. Має сенс також врахувати найважливішу властивість системи — те, що взаємодіючі елементи системи у її складі виявляють *емерджентність* — властивості не властиві цим елементам поза *системою*.

У загальному поданні взаємодіючі елементи, що становлять *систему*, можуть мати будь-яку природу, як фізичну, так і не фізичну. Враховуючи інженерну спрямованість предмета нашого розгляду, видається доцільним, виключивши із фокусу нашого розгляду *системи*, що мають не фізичну природу, а

також біологічні, екологічні, економічні, політичні та подібні до них системи, зосередитися на *складних інженерних системах*.

Відомо багато підходів до оцінювання ступеня *складності інженерних систем*. Виходячи із загальної теорії *систем*, *складні системи* мають такі властивості: **унікальність, слабопередбачуваність, негентропійність**. Можна вважати *складними інженерними системами* продукцію наукоємного виробництва. Одна із градацій віднесення до різних категорій складності побудована на основі аналізу відповідей на запитання:

- наскільки важко описується система?
- наскільки систему важко створити?
- який рівень організованості системи?

Для оцінювання ступеня складності зручно та наочно використовувати підхід, запропонований міжнародною радою з системної інженерії (INCOSE) [8]. Тоді до категорії складних, дуже складних і суперскладних інженерних систем потрапляють продукти, відповідно: авіабудування, ракетобудування, систем озброєнь; безпілотні літаки та апарати; а також підприємства із працюючим устаткуванням та людьми.

Показано, що всі *системи* є елементом інших *систем* або самі включають до себе інші *системи*, як елементи системи. Найчастіше такий зв'язок носить ієрархічний характер, хоч і не завжди, іноді і мережевий. Єдиної, загальноприйнятої термінології іменування різних елементів системи різних рівнів немає. Часто верхні по відношенню до аналізованої системи називаються надсистемами, нижчестоящі – підсистемами, компонентами, субкомпонентами, деталями. У стандарті ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2] систему, на якій фокусується

розгляд, називають системою, *що розглядається*, або такою, що становить інтерес (System-of-Interest, SOI). І вже відносно неї прийнято вибудовувати логіку міркування: системи забезпечення (Enabling System), ті, що покликані забезпечити розвиток системи, *що розглядається*. Вводиться поняття *систем в експлуатаційному відносно системи, що розглядається*, середовищі, їх називають *системи в середовищі функціонування*. На стадіях життєвого циклу проєктів відповідні *системи забезпечення* і *системи, що розглядаються*, зручно враховувати спільно або як єдину систему.

Аналіз *складних інженерних систем* зручно виконувати на основі подання *системи, що розглядається*, в ієрархічному взаємозв'язку з нижчестоящими *системами* і *системними елементами*. Хоча іноді взаємозв'язки бувають і поза ієрархією, так звані *мережеві*.

Кожні із нижчестоящих взаємодіючих *систем* і *системних елементів* призначені для досягнення заданих їм підцілей. При цьому мають реалізовуватися наступні, стосовно цих *системних елементів*, вимоги: між *системними елементами* мають існувати будь-які відносини, як правило, **ієрархічні**, іноді **неієрархічні** (як у мережах або розподілених системах); на будь-якому рівні *системних* подань будь-яка *сутність* може бути представлена як *система*; *система*, що інтегрує у собі досягнення різних вимог, вміщує у собі певну множину нижчестоящих *системних елементів*, здатних реалізувати досягнення цих вимог.

Важливим напрямом роботи зі складними інженерними об'єктами (літаки, ракети, БПЛА, виробничі структури та подібні до них) є методологія *системного підходу* і

використовуваний у цій методології метод всебічного різнорівневого розгляду об'єктів, який називають *системним мисленням*.

Вироблено різні підходи до спрощення розгляду систем, сьогодні одним із ефективних підходів вважається так званий «рекурсивний» метод. В цьому методі зниження складності розгляду досягається двома шляхами. Перший – коли *система* поділяється на окремі елементи на різних системних рівнях і вони розглядаються, як «чорні ящики», не враховуючи їхньої внутрішньої структури. Другий шлях – замість повного розгляду кожної *системи*, розглядається *система* за допомогою множинних її описів, як «прозорого ящика», включаючи функціональний, конструктивний, просторовий та інші можливі описи.

• Що таке «системна інженерія»?

Поява в середині XX століття та бурхливий розвиток у наш час нової прикладної системної методології – *системної інженерії*, стало відповіддю на об'єктивні виклики розвитку суспільства – ускладнення створюваних людиною інженерних об'єктів, розширення областей інженерної діяльності на нові регіони світу, підвищення відповідальності за її результати. Бачення предметної спеціалізації *системної інженерії* розвивалися і на сьогодні є загальне розуміння її подання. Різні її визначення загалом підкреслюють, що *системна інженерія* – це **керівництво створенням складних інженерних систем шляхом використання наддисциплінарних підходів, успішних у користувачів, які вирішують актуальні проблеми.**

Виділено ряд ключових особливостей, які відрізняють спеціалізацію *системної інженерії* від інших предметних інженерних спеціалізацій.

Основні з них:

- *системний інженер*, спираючись на особливості *системного мислення* під час розгляду об'єкта як *системи*, зобов'язаний враховувати не лише технічні параметри функціонування *системи, підсистеми*, а й виявляти та враховувати потреби замовників та особливості майбутньої експлуатації та обслуговування цієї *системи*;
- у поняття *керівництва створенням складних інженерних систем*, що є компетенцією *системного інженера*, входить також необхідність участі у виробленні та прийнятті найважливіших проєктних рішень;
- *системний інженер*, відповідаючи за всю *систему* загалом, зобов'язаний відстежувати, координувати розроблення та створення інших її *елементів та підсистем*, а також фізичні, функціональні інтерфейси їхньої взаємодії.

Наведемо основні ознаки *складних інженерних систем*, у створенні яких потрібна участь кваліфікованих *системних інженерів*; це якщо коротко:

- великий чи значний обсяг складних конструктивних елементів, що передбачає застосування нових технологій;
- висока різноманітність компонентів *систем* з різними типами інтерфейсів;
- використання нових та новітніх технологій у технічних елементах *системи*, які відповідають за досягнення основних функціональних властивостей.

Основні етапи розвитку системної інженерії: етап «становлення» - від 40–50-х років до 90-х років минулого століття та нинішній – етап «координації».

За останні десятиліття і нині дедалі більше зміцнилося усвідомлення, що в основі створення *складних інженерних систем* лежить колективна діяльність, координована і керована *системним інженером* із розвитку *життєвого циклу систем*. При цьому дедалі більше зміцнюється пріоритетність управляючої компоненти цієї діяльності проти її технічної складової.

Показана принципова різниця у розробленні вимог, які є спонукальним мотивом для створення майбутньої системи оборонного та цивільного характеру. Відзначається складність і малоформалізованість процедур самих ранніх етапів створення *складної інженерної системи*.

Наголошується на важливості скоординованості дій, починаючи із ранніх стадій формування вигляду майбутньої *системи*, фахівців з управління *проєктом* та *системних інженерів*.

Укрупнено наведені області відповідальності діяльності *системних інженерів*: визначення та досягнення функцій системи, відповідність її цілям, координація робіт із постачальниками, які мають забезпечувати виконання функцій своїх *систем* та *підсистем* у системі, *що розглядається*.

На відміну від цього керівники проєкту відповідальні за планування та контроль робіт проєкту, контроль термінів, фінансів, договірних зобов'язань, ризиків проєкту та забезпечення контролю якості у виконаних роботах проєкту.

Таким чином, у зоні функцій управління **проектом** знаходиться і функціонал спеціалізації *системної інженерії*.

Як найважливіший напрям реалізації методології *системної інженерії* на практиці окремо виділяється формування її нормативно-технічного базису.

Показано, що перший із публічних нормативних документів у сфері системної інженерії виник ще у 1966 році як Керівництво 375-5 [25], розроблене ВПС США.

В даний час найважливішою віхою у розвитку та практичному використанні методології системної інженерії є комплекс стандартів, розроблених у цій галузі Міжнародною організацією стандартизації (ISO), міжнародною електротехнічною комісією (IEC) за участю багатьох некомерційних та виробничих організацій, товариств та об'єднань. Основним тут є стандарт ISO/IEC/EEE 15288:2015 [2] та аналогічний йому національний стандарт України, запроваджений у 2016 році.

Окрім цих та інших подібних Міжнародних стандартів, що описують різні методи, підходи, процеси *системної інженерії*, активно ведеться подібна робота багатьма світовими продуцентами високотехнологічної наукоємної продукції, зокрема Airbus, Boeing, NASA та іншими.

Питання для самоконтролю глави 1

1. Чому поняття «система» має різні трактування? Чому системний ефект – емерджентність, вважається невід'ємною властивістю «системи»?
2. Про які особливості визначення «складної інженерної системи» наголошується у системній інженерії?

3. Чи можна вважати систему, що розглядається, разом із системами її забезпечення складовими низки систем в середовищі функціонування? Чи йдеться тут виключно про взаємодію системи, що розглядається, із цими системами в середовищі функціонування?
4. Чи вважаєте, що є якісь переваги у текстового подання дерева ієрархії системи у порівнянні із графічною формою подання ієрархічної структури системи, що розглядається? Можете назвати недоліки кожного підходу?
5. Чому використовується рекурсивний підхід (рекурсивне мислення) для подання складності системи?
6. У чому сутність «системної інженерії» як прикладної дисципліни?
7. Чому наголошується саме на міждисциплінарних підходах у системній інженерії? У чому полягають основні особливості спеціалізації системної інженерії?
8. Які ознаки системи, у якій необхідна участь системного інженера?
9. Які ідеї вважаються методологічними основами системної інженерії?
10. Які основні «кроки» конкретизують дії керівника в рамках системного підходу стосовно інженерної діяльності?
11. Чи можна вважати системну інженерію невід'ємною частиною робіт проєкту створення складної системи? Чи існує взаємозв'язок функцій управління проєктом та системної інженерії?

Глава 2: Подання та опис складних інженерних систем

2.1 Структура та розбиття системи

Раніше зазначалося, що людина, виділяючи будь-який рівень системного розгляду об'єкта - складну інженерну систему, завжди, в силу специфічності системного підходу, має на увазі наявність вищестоящих над нею «надсистем» і нижчестоящих «підсистем». Наприклад – літак під час розгляду його проєктантом і виробником, це, безумовно, система, надсистемами якої є виробництво – завод, а підсистемами якої є, наприклад, планер, шасі, двигуни, системи авіоніки. Також, безумовно, з погляду пасажирів або служби організації повітряного руху - літак, це підсистема системи повітряного транспорту, яка включає аеродромне господарство, службу забезпечення польотів, службу підтримки в експлуатації тощо. Отже, можна стверджувати, що подання *системи* не об'єктивно, а суб'єктивно [3]. Системи визначають люди.

• Проєктні ролі у системі

Ролі людей щодо участі у проєктах створення систем (ініціація ідей, розроблення концепції, створення, експлуатація системи) назвали *проєктними ролями*. Сьогодні прийнято вважати, що *проєктні ролі* мають не лише ті люди, які впливають на систему, а й ті, на яких система, у свою чергу, теж впливає.

Проєктні ролі називають іноді організаційною, функціональною роллю. Як заведено у системному мисленні –

термінологія не первинна, важлива сутність. До речі, звертаємо увагу на те, що ролі та посади – це різні сутності. Людина може бути на посаді інженера, а виконувати будь-яку господарську роль чи функцію.

Проектна роль за хронологією передуює появі системи. Якщо не визначено проектну роль Ініціатора, Розробника або Замовника, то *систему* нікому визначити, нікому звернути на неї увагу, нікому виділити її із навколишнього світу [3].

Для того, щоб розпочати створення системи, всім основним проектним ролям необхідно досягти домовленості у тому, яку систему створюють. Очевидно, що різні *проектні ролі* можуть мати різне уявлення про основні цілі, функції, їхню пріоритетність, які має реалізувати майбутня *система*. Мало того, ці уявлення можуть бути протилежними. Суперечності в цьому немає. Це, навпаки, характерна риса ранніх етапів створення нової складної інженерної системи. *Проектні ролі* зазвичай мають свої *шкали переваг* реалізації функцій *системи*. Успішність *системи* починає проявлятися на цьому її самому ранньому етапі – якщо вдалося основним *проектним ролям* знайти компроміс, який влаштовує їх всіх, то далі після цілої низки етапів ініціації, розроблення, виробництва, експлуатації, за сприятливого збігу обставин, зовнішніх факторів, ця *система* може задовольнити очікування замовників, споживачів та представників інших різноманітних *проектних ролей*.

Можливо, ще на старті роботи може бути запропоновано таку систему, з приводу функцій якої не треба буде шукати компроміс серед *проектних ролей*, вона всіх влаштовуватиме. Але це більше гіпотетичний варіант.

Істотно важливо не прогати, не залишити поза увагою будь-яку *проектну роль*. Це, як показує практика, може завдати важкої шкоди майбутній *системі*, аж до її анулювання.

Важливим результатом діяльності *проектних ролей* є визначення *меж системи* у фізичному світі. Причому, на визначення цих меж впливають як *внутрішні проектні ролі системи* – команда розробників, менеджерів, випробувачів, так і *зовнішні проектні ролі* – ті, які представляють зовнішні, стосовно даної системи, інші системи чи такі, які хоч якось впливають на них.

До одного із ранніх етапів розгляду системи проектними ролями належить виділення *ієрархічних рівнів* майбутньої *системи*.

• Ієрархія рівнів у складних інженерних системах

Використовуючи поширений інструмент *системної інженерії* – моделювання, представимо *складну інженерну систему* за окремими її *ієрархічними рівнями*, які прийнято позначати як: *системи, підсистеми* – для *верхніх рівнів ієрархії* та *деталь* – для найнижчих.

Для зручності розгляду [6] виділено ще два проміжні рівня, які розміщуються нижче *підсистеми* – *компоненти* та *субкомпоненти*¹⁶.

Раніше наголошувалося на умовності різного подання ієрархічних рівнів *систем*. *Система* залежно від проектної ролі може розглядатися і бути частиною складнішого об'єкта, або

¹⁶ Раніше, у вітчизняній практиці – ГОСТ 2.711-82 [40] ЕСКД було прийнято іншу схему поділу виробу, у нашому випадку системи на складові: комплекси, складальні одиниці, деталі.

суперсистеми, а підсистему часом можна визначати, як систему.

Спрощуючи розгляд, прийняли [6], що *системою* позначаємо об'єкти, що мають властивості *комплексної системи* і одночасно виконують свою робочу функцію лише за допомогою оператора.

Наступний за *системою* нижчестоящий рівень - *підсистема* - це зазвичай велика частина *системи*, яка виконує низку пов'язаних між собою функцій, яка володіє багатьма якостями *системи* окрім можливості виконувати корисну функцію без суміжних із нею інших *підсистем*.

Компонентами зазвичай позначають елементи системи нижчого рівня, іноді (США) використовують термін – *елементи конфігурації*, еквівалентний до терміну *компоненти*. Зазвичай *компоненти* реалізують комплекс важливих для системи функцій. На наступному, нижчому рівні ієрархії розташовуються *субкомпоненти*, що реалізують елементарні функції, які складаються із декількох деталей.

І за ними, за ієрархією – деталі, елементи, що виконують якісь суттєві функції у поєднанні із іншими деталями [6]. На рисунку 2.1 та таблиці 2.1 як приклад наведені три типових представники різних систем та ієрархічну побудову їх структурних елементів.

Таке уявлення, крім іншого, дозволяє виявити різні *проектні ролі* команди розробників *системи*. Вочевидь, що предметні спеціалісти – фахівці з різних систем проектування переважно володіють інформацією і мають відповідні знання другому і нижче системних рівнях ієрархії. *Проектна роль системного інженера* зосереджена на виявленні функціональних можливостей *системи* загалом та її елементів, зокрема, а також

різноманітних інтерфейсів *системи*. Найважливішим завданням *системного інженера* є забезпечення взаємодії спеціалістів та наступності рішень, які приймаються на різних рівнях ієрархії системи, а також на суміжних етапах її розроблення. Крім цього, до питань *проектної ролі системного інженера* входить оцінка взаємодії розроблюваної системи з її оточенням.

Реалізація різних проектних ролей у процесі створення *складних інженерних систем* буде розглянута у наступних розділах, присвячених розвитку системи за стадіями та етапами її життєвого циклу.

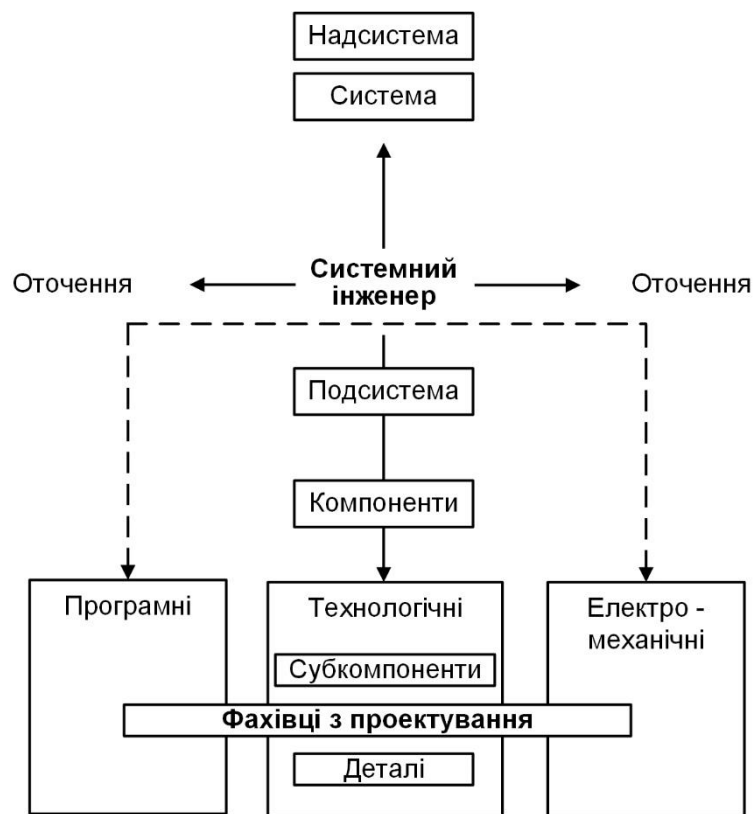


Рис. 2.1. Проектні ролі системного інженера та спеціаліста із проектування в моделі ієрархії системи.

Таблиця 2.1. Ієрархічне подання трьох типових систем:
інформаційної, металообробної, авіаційної.

Типи систем		
Інформаційні	Системи металообробки	Транспортні літаки
Приклад системи		
Комп'ютер	Автомат для з'єднання агрегатів літака	Літак
Приклад підсистем		
База даних	Обробні центри	Двигуни
Приклад компонентів		
Програми баз даних	Механізм переміщення інструментів	Колесо турбіни на валу
Приклад субкомпонентів		
Електронні сховища	Редуктор	Колесо турбіни з лопатками
Приклад деталей		
Алгоритми	Шестерні	Лопатка турбіни

У реальному житті, звичайно, все виглядає не так просто. Під час створення *складних інженерних систем* на всіх її ієрархічних рівнях формально чи неформально визначаються проєктні ролі, що відповідають не лише за досягнення функціональності, конструктивності елементів свого рівня, а й за забезпечення інтерфейсів його взаємодії як із елементами *систем* «по горизонталі», так із елементами систем, вищестоящими за відношенням до них у ієрархії подання.

Умовно фахівців, які грають ці ролі, можна назвати *системними інженерами* підсистем, компонентів та субкомпонентів створюваної системи. Структурно вони можуть працювати у різних функціональних підрозділах, але основні їхні *проєктні ролі* полягають у забезпеченні системного подання довіреного їм елемента підсистеми всієї системи.

Приклад. В унікальному виданні [43] дуже наочно наведено багато проєктних ролей, як сьогодні сказали б *системних інженерів* різних ієрархічно-структурних рівнів *системи* – «Літак» Ан-124 «Руслан», які брали участь у її створенні. Там виділено 13 видатних науково-технічних проблем, вирішених під час створення *системи* – літака. Всі етапи виявлення цих проблем, пошуку шляхів їх вирішення, успішного вирішення, проаналізовано майже через 40 років успішної експлуатації цієї *системи*. Розповідають у цьому виданні про перипетії тих років створення *системи*, в основному, ті самі *системні інженери*, різних рівнів ієрархії, це розробники агрегатів планера, фюзеляжу, крила, оперення, ще дрібніших їх компонентів різних *систем* літака. Розробники технологій унікальних напівфабрикатів – довгомірних суцільнопресованих панелей крила із «законцовкою», виготовлених вперше у світі, на унікальному технологічному устаткуванні. Це і пілоти – випробувачі, які також брали участь у програмі створення системи не лише як пілоти, а як інженери, ергономісти, які мають свої *проєктні ролі в системній інженерії*.

Ефективно реалізовані цими фахівцями *проєктні ролі*, у тому числі *системних інженерів*, дозволили досягти результатів світового рівня. Ці результати і сьогодні, через багато десятиліть, працюють на фірму «Антонов», на бюджет країни, і на задоволення попиту на перевезення великогабаритних вантажів.

• Опис декомпозиції системи

Строго кажучи, *системний підхід* відрізняється від інших методологій пізнання яскраво вираженою *трансдисциплінарністю*. Наслідком цього є участь у розгляді, побудові, еволюціях *системи* багатьох різних *проєктних ролей*. Відповідно до свого місця, до своїх проєктних ролей, вони по-різному можуть представляти декомпозицію системи. Наприклад, хтось цікавиться функціями частин ракети: корпус,

оперення, двигун, бойова частина, представник іншої *проектної ролі*, вважає її предметом краплеподібної форми - наприклад, аеродинамік, третього за своєю проектною роллю, цікавить точність попадання ракети в ціль.

Для прогнозування ключових аспектів поведінки *системи системний метод* мислення, трансдисциплінарний підхід приймають множинність описів та декомпозиції системи на різних її ієрархічних рівнях. Відповідно до своїх проектних ролей, для реалізації своїх завдань і переваг *системним інженерам* потрібна побудова різних прикладних моделей елементів *системи* та *системи* в цілому.

Одним проектним ролям потрібно знати, як система працює у складі своїх елементів для виконання своєї функції; іншим проектним ролям необхідно знати конструктивне забезпечення заданих функцій, третім – з чого краще та технологічніше виготовити елементи конструкції, четвертим – фінансові показники створення системи тощо.

Загальноприйнято в *системному мисленні* із різних можливих множинних описів *системи* виділяти три основні види опису декомпозиції *системи* [3]:

- описи підсистем як функціональних об'єктів («як працює?»);
- як фізично, конструктивно забезпечується реалізація цих функцій – продуктова, модульна декомпозиція («із чого складено?»);
- як у просторі розміщуються частини системи («де знайти, куди доставити?»).

У відомому стандарті ІЕС 81346-1:2009 [44] цей метод трирольової декомпозиції проілюстровано наступним чином (рис. 2.2):

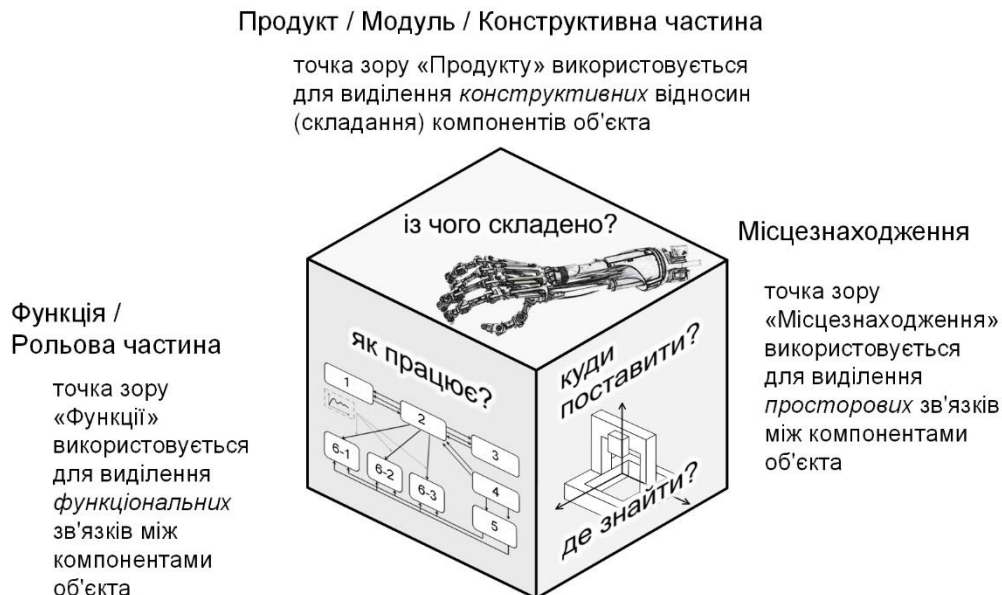


Рис. 2.2. Трирольове подання складної інженерної системи [3, 44].

Системні ієрархічні рівні прийнято визначати за функціональною декомпозицією системи.

• Функціонально-фізичне подання систем

У фахівців, які давно практикують у галузі створення складних інженерних систем, зазвичай не викликає труднощі питання виявлення функціональної структури системи або нижчих за ієрархією системи рівнів, які знаходяться в полі його фахових інтересів. Також, відпрацьований і інструментарій їх подання, наприклад, у формі різних функціональних схем IDEF діаграм [45], стандартів OMG Essence [33], діаграм Use Cases [46] та інших способів формалізації опису системи, прийнятих у відповідному корпоративному середовищі.

Для недостатньо знайомих із цією специфічною діяльністю буде корисним підхід виявлення функціональної структури,

приведення її у відповідність із фізичною структурною системою, наведений в роботі [6].

На самому ранньому етапі виявлення функціональної структури майбутньої системи пропонується спочатку подавати все можливе різноманіття функціональних елементів у вигляді трьох основних функціональних сутностей:

- інформацією;
- речовиною;
- енергією.

Причому інформаційну функціональну сутність, найбільшою мірою властиву складним інженерним системам, порівняно із двома іншими, доцільно розділити на два класи елементів – сигнальні, які мають справу із передачею інформації та стаціонарні, які мають справу зі стаціонарною інформацією.

Тоді, достатньо умовно, можуть бути виділені чотири класи функціональних елементів системи:

- *інформаційні сигнальні*, призначення яких на отримання, передача інформації;
- *інформаційні стаціонарні*, що служать для оброблення, впорядкування та управління інформацією;
- *речові*, призначення яких – формування структури та перетворення матеріальних об'єктів;
- *енергетичні*, призначені для забезпечення системи енергією чи рушійною силою.

Далі проводиться декомпозиція цих чотирьох типових класів функцій до рівня, який дозволяє виявляти функціональні елементи – фізичні компоненти створюваної системи. На рисунку 2.3 наведено спрощений алгоритм цих дій та приклад їх реалізації – таблиці 2.2–2.3.

У таблиці 2.3 наведена більш докладна класифікація фізичних компонентів системи в залежності від їх фізичної природи та принципів дії, у взаємозв'язку із функціональними елементами, що радять цим компонентам. Таке або подібне подання дозволяє систематизувати, класифікувати типові складові частини систем з їхнім функціональним призначенням.

Маючи певний досвід, функціональну схему будь-якої системи, можна побудувати, перетворюючи подані на *входи системи* впливи взаємопов'язаними функціональними елементами, так, щоб на *виході* можна було отримати результати. Одне із важливих завдань системного інженера полягає у реалізації абстрактних функціональних елементів у фізичні дії, які здійснюються за допомогою відповідних фізичних *компонентів*.

Вважають, що починаючи із рівня компонентів системи (рис 2.1) і вище проявляються значні функціональні можливості, які визначають найважливіші функції системи.

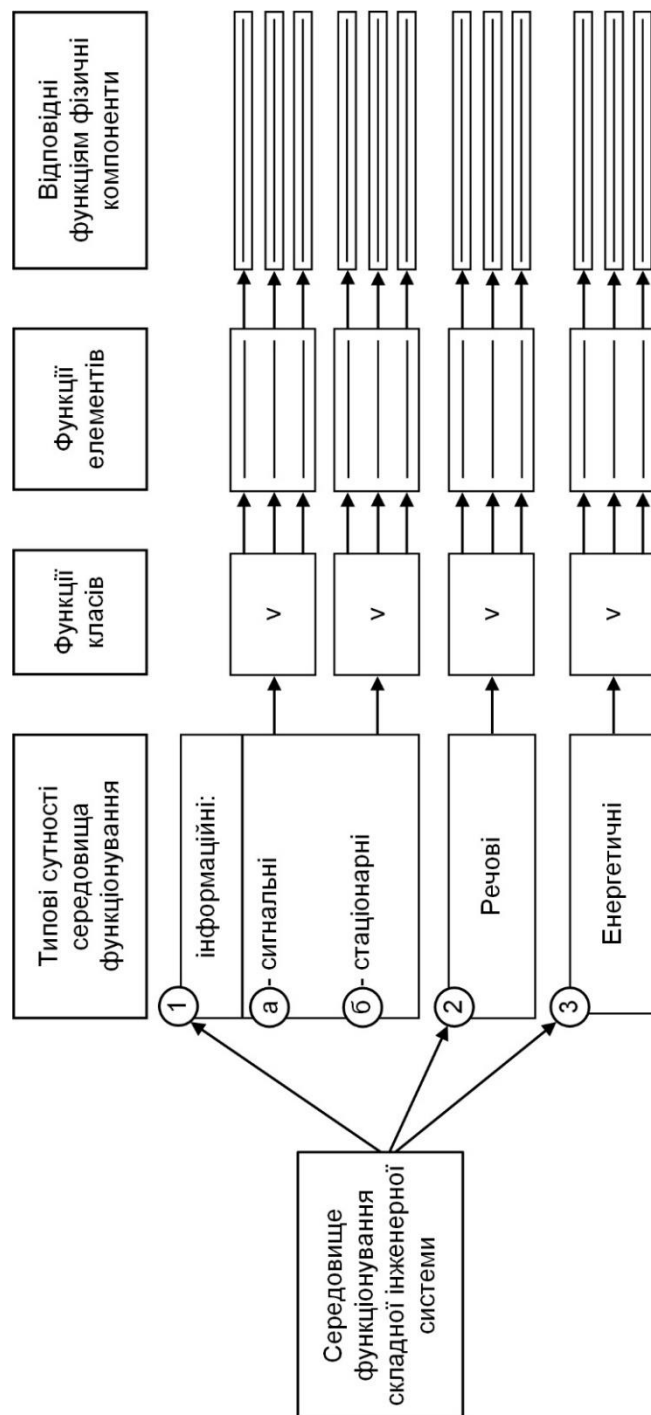


Рис. 2.3. Спрощений алгоритм функціонально-фізичного подання системи, який використовується на ранніх стадіях створення системи.

Таблиця 2.2. Приклади функціонально-фізичного (компонентного) подання елементів системи.

Типові сутності середовища функціонування складної інженерної системи	Класи функціональних елементів	Функція класу	Функція елемента	Відповідні функціям фізичні компоненти системи
Інформаційна – сигнальна	1	Поводження із <i>сигналом</i> - генерація, передача, розподіл, прийом сигналів.	Введення сигналу; Передача сигналу; Перетворення сигналу; Прийом сигналу.	Камера спостереження; Радіопередавач; Радіолокаційна антена; Радіоприймальний пристрій.
Інформаційна – стаціонарна	2	Поводження із <i>даними</i> - аналіз, інтерпретація, структурування даних та інформатії до видів, що сприймаються іншими системами або користувачами.	Введення даних; Оброблення даних; Управління даними; Перетворення даних; Виведення даних.	Клавіатура, приймальний пристрій; процесор комп'ютера; Операційна система; Текстовий процесор; Принтер, екран.
Речова	3	Поводження із <i>речовиною</i> - формування структурної основи або оболонки, каркасу системи, а також зміна форми, складу або положення речовинної субстанції.	Забезпечення цілісності системи; Перетворення матеріалу; Формування; Поеднання матеріалів; Позиціонування матеріальних об'єктів.	Корпус літака; Автоклав; Металообробний верстат; Зварювальний апарат; Сервопривід.
Енергетична	4	Поводження із <i>енергією</i> - генерація енергії або рушійної сили для системи, перетворення енергії із одного виду в інший.	Генерація тяги; Крутного моменту; Електрики; Підтримка температури; Контроль руху.	Турбореактивний двигун; Роторний двигун; Вітряний двигун; Холодильник, кондиціонер; Автоматична коробка передач

Таблиця 2.3. Приклад та категорювання фізичних компонентів та відповідних їм функцій елементів систем.

Категорія класів	Номер класу	Функції елементів	Фізичні компоненти системи та їх класи
Програмні	1	Система управління; Управління обробленням даних; Система управління.	Операційна система; Програмне забезпечення; Вбудоване ПЗ.
Електронні	2	Прийом сигналу; Передача сигналу; Оброблення даних; Оброблення сигналу; Оброблення сигналу/даних; Різні.	Приймач; Передавач; Блок оброблення даних; Блок оброблення сигналів; Процесор передачі; Спеціальне електронне устаткування.
Електронно-оптичні	3	Введення сигналу; Збереження даних; Формування вихідного сигналу/даних; Надання форми матеріалу; Генерація електроенергії.	Оптичний датчик; Оптичний запам'ятовуючий пристрій; Пристрій відображення; Високоенергетичний оптичний пристрій; Фотоелектричний генератор.
Електромеханічні	4	Від даних; Генерація електрики; Збереження даних; Перетворення сигналу; Введення-виведення даних.	Інерційний прилад; Електрогенератор; Пристрій зберігання даних; Перетворювач; Пристрій введення-виведення даних.
Механічні	5	Забезпечення опору навантаження; Зберігання матеріалів; Надання форми матеріалу/сполучення матеріалів; Вступ матеріалів у реакцію; Контроль руху.	Несуча конструкція; Ємність; Машина для оброблення матеріалів; Реакційний апарат; Пристрій перетворення енергії.
Термомеханічні	6	Генерація крутного моменту; Генерація тяги; Підтримка температури; Підтримка температури; Генерація електроенергії.	Двигун внутрішнього згоряння; Реактивний двигун; Нагрівальний пристрій; Охолодний пристрій; Спеціальне джерело енергії.

Тому компоненти системи прийнято ще визначати як складові частини системи або, як у традиційній вітчизняній термінології – *складовими частинами виробу*. Слід мати на увазі, що компоненти системи можуть бути як унікальними – що вимагають індивідуального розроблення для даної системи, так і запозиченими із попередньої системи або купованими, їх ще називають у зарубіжній практиці – *комерційними компонентами*, а у вітчизняній – купованими виробами. Очевидно, що там, де це можливо, для створення системи слід використовувати компоненти запозичення із попередніх систем та комерційно-куповані. Це здешевлює розроблення, знижує ризики та терміни створення системи. У той же час це дозволяє забезпечити модульність та уніфікацію системи, не знижуючи її варіабельність. Створюючи літак, системні інженери заздалегідь передбачають, що такий компонент або підсистема як двигун мають бути варіативною залежно від вимог експлуатації та бажання замовника. Водночас у системі завжди буде певна частка компонентів або підсистем, які потребують унікального розроблення та не можуть бути запозичені із попередніх систем або придбані як універсальні. В авіабудуванні такими, наприклад, є підсистеми або компоненти літака: фюзеляж, крило, оперення, шасі та ціла низка інших. Їх неможливо уніфікувати, вони розробляються щоразу індивідуально під конкретну модель літака. Деякі з них при цьому можуть відноситися до придбаних по кооперації – тобто формально до комерційних компонентів.

Необхідно мати на увазі, що запозичені або комерційні (куповані) компоненти не прийнято ділити на складові нижчого рівня ієрархії. Зазначимо також, що схему, яка поділяє систему

на складові частини — компоненти системи, зазвичай виробляють зі стадії ескізного проєктування або технічного проєкту, якщо цей ескізний проєкт для даної системи не передбачений.

Під час перетворення *функціональних елементів у фізичні компоненти*, крім абстрактних взаємодій, найважливішого значення набувають фізичні взаємодії між ними — види та типи з'єднань, допуски та посадки, вибір матеріалу та технологій формоутворення, доступність існуючих типорозмірів компонентів, контролепридатність, безпека, екологічність, вартість, терміни постачання. Особлива увага *системного інженера* фокусується на питанні несуперечності конструкторсько-технологічних рішень із функціональним результатом.

Приклад. Довічна дилема системного інженера літака полягає у виборі силової установки. Відомо, що цикл розроблення двигуна часто перевищує цикл розроблення літака. Готовність або неготовність двигуна до використання його в даному літаку багато в чому визначає успіх літака - системи. Наскільки *системний інженер* має бути компетентним у питаннях розробки силової установки, щоб відносно безпомилково спрогнозувати терміни готовності її до експлуатації та ймовірність досягнення нею основних параметрів ефективності **експлуатації у складі системи загалом**.

Таким чином, *системний інженер*, крім іншого, має мати великий багаж знань у галузі можливостей фізичної реалізації проєктних властивостей системи, за допомогою відповідних її компонентів.

2.2 Поняття життєвого циклу системи

Поняття *життєвого циклу системи*, мабуть, прийшло історично від подання біологічних систем. Там, справді – біологічний об'єкт еволюціонував: поява яйця, черв'яка, потім личинки, метелика – це життєвий цикл *системи*, причому той, що розвивається у своїй самодостатності. За умови перенесенні поняття *системи* на об'єкти неорганічної природи – структури, множини та подібні до них залишився термін: *життєвий цикл*. Але він у собі вмещав вже інше поняття: просто інтервал часу, у якому із *системою*, **що розглядається, відбувається еволюція її перетворення, з одного стану на інший, причому цю еволюцію можна було умовно розділити на стадії чи фази.**

У літературі зазначається [3, 47], що в 70-х роках минулого століття поняття *життєвого циклу* з позицією *системного* підходу стали застосовувати, як до суто управлінських завдань, що згодом стали називати *управлінням проєкту*, а також і до процесів створення *систем*. Відомо твердження Harold Kerzner, «Project Management: Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling» [48], **що управління проєктами на початку його розвитку було застосуванням системного підходу до планування, побудови графіка робіт і контролю їх виконання.** На тому ранньому етапі формування уявлень та понять про *системну інженерію* вся увага зосереджувалася на мінімізації часу проходження робіт проєкту через усі його стадії. Поняття *життєвого циклу систем* у ранніх версіях – це роботи систем щодо забезпечення від появи ідей *системи, що розглядається*, до її ліквідації [3]. В останній за часом версії міжнародного стандарту ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2] наводиться таке подання: **«Кожна система має життєвий**

цикл... *Життєві цикли* змінюються відповідно до цілей, використання *системи* та переважних обставин. Кожна стадія має свої цілі та внесок у життєвий цикл і розглядається під час планування та здійснення всього *життєвого циклу системи*».

Ймовірно, одним із загальноприйнятих і легко сприйманих понять терміну *життєвий цикл* системи є наступний: «це покрокова еволюція створюваної системи від задуму через розроблення до виробництва, експлуатації та подальшої ліквідації» [6].

• Модель життєвого циклу

З наведеного вище випливає, що єдиної точки зору на подання *життєвого циклу системи* не існує. Тому немає і єдиної моделі опису *життєвого циклу системи*. Занадто різні за своєю сутністю складні інженерні системи, різні вимоги, які висувають до опису їх життєвого циклу споживачі, фахівці-системники, організації зі стандартизації, інженерні спільноти.

Тим не менш, в тій чи іншій мірі всі відомі моделі включають низку періодів існування системи, що розділяються моментами прийняття якихось важливих для розвитку *системи* рішень. Було б наочно, якби перехід від одного періоду розвитку системи до наступного, відповідав би переходу від одного якісно відмінного виду діяльності *системного інженера* до іншого. Крім цього, бажано щоб була відома відповідність у розумінні між цими періодами розвитку та найбільш уживаними моделями життєвого циклу, що використовуються у середовищі *системних інженерів*.

Перед тим, як обрати ту чи іншу *модель* для опису *життєвого циклу системи* як базову, пізнавально ознайомитися із тим, як за часом за останні 30-40 років еволюціонували різні моделі опису життєвого циклу інженерних систем.

- **Еволюція уявлень про моделі життєвого циклу інженерних систем**

Найраніші за часом моделі подання *життєвого циклу системи* виглядають як зістиковані між собою «відрізки» *періодів, фаз, стадій життєвого циклу* (рис. 2.4). Зауважимо, що аналогічно подавалися моделі життєвого циклу управління **проектами** (рис. 2.5).

Трохи пізніше прийшло розуміння того, що між окремими періодами, стадіями життєвого циклу системи не може бути явно виражених меж.

Межі між окремими періодами, стадіями стали позначати стрілками, показуючи «розмитість часу» переходу системи із одного до іншого стану (рис. 2.6).

Дійсно, коли створюється *складна інженерна система*, то межі цих періодів – стадій дуже умовні, так навіть на стадії задуму вже виникає необхідність опрацювання виробничо-технологічних завдань, створюються експертні групи зі спеціалістів різних фахових напрямів діяльності, вони визначають принципову здійсненність тих чи інших ідей, які виникають на стадії задуму.

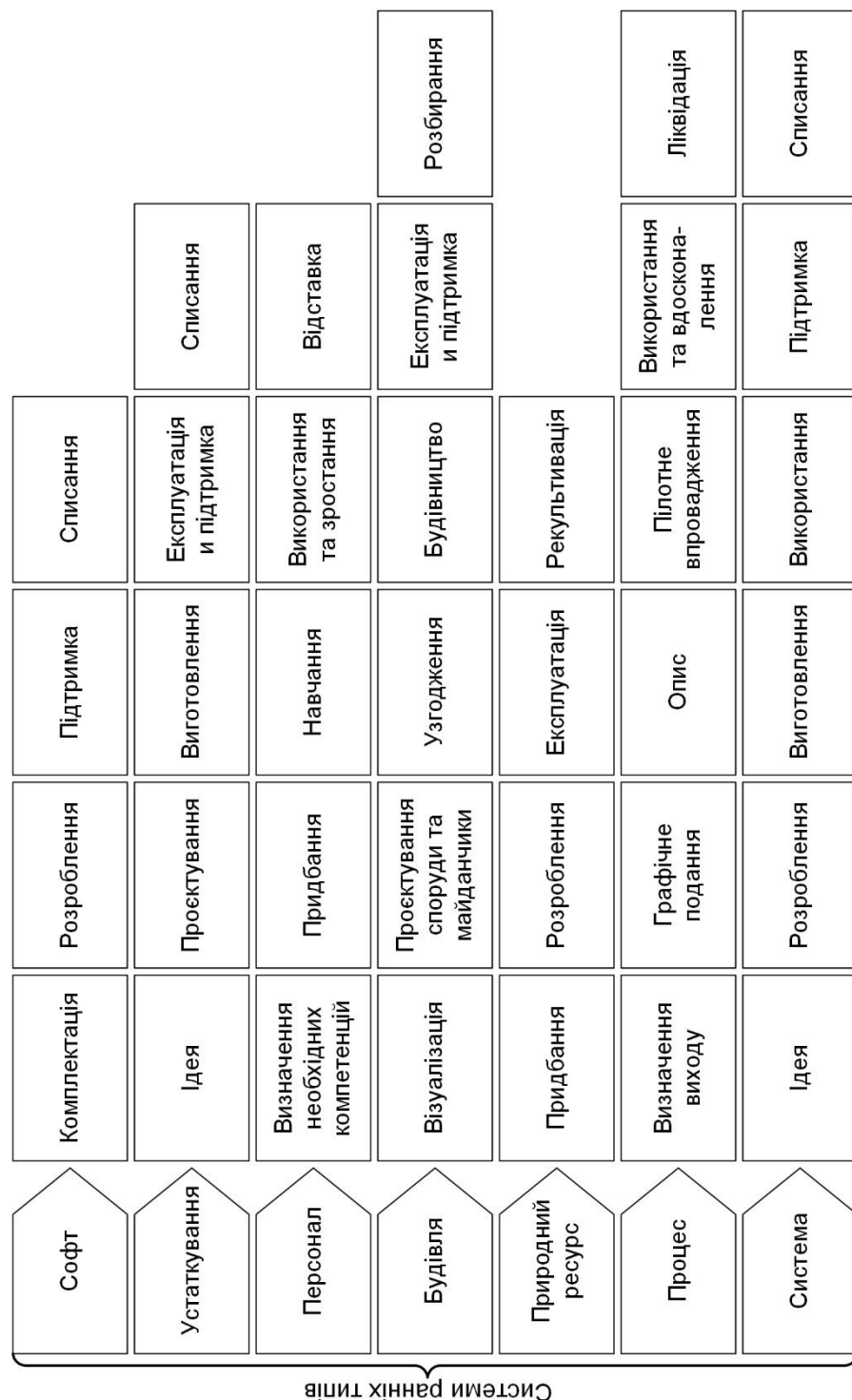


Рис 2.4. Приклад ранніх моделей подання життєвого циклу систем різних типів [3].

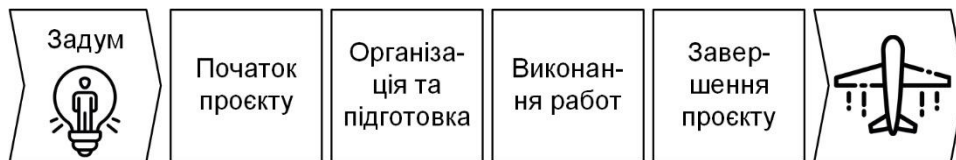


Рис. 2.5. Приклад спрощеного подання моделі життєвого циклу проєкту.



Рис. 2.6. Стрілочне візуальне подання моделі життєвого циклу системи [3].

Приклад. Історія створення літака Ан-124 «Руслан» [43]. Починаючи із ранніх стадій *задуму* вже принципово визначилася технологічна і технічна концепція літака. Спочатку, в 1968 році, розглядалася можливість використання наявного рівня технологій та матеріалознавства, а також наявних знань із аеродинаміки крила майбутнього літака. Тобто, якщо на рисунку 2.6 стадія задуму переступила стадію «проектування», зачіпала стадію «виготовлення». Нічого дивного тут нема. Чим складніша і унікальніша система, тим складніше уявити та описати модель її життєвого циклу.

Стало ясно, що для *складних інженерних систем* і проєктів, що їх забезпечують, досягти відразу попередньо запланованого результату з першого разу не вдається, а розроблення часто ведеться, як «судові справи – із урахуванням нових обставин, що безперервно відкриваються» [3]. Перехід із одного стану в інший дедалі менше стали пов'язувати із «фізичним часом» і дедалі більше із «логічним». Це знайшло свій відбиток у моделі, так званого водоспаду/каскаду [3, 49] (рис. 2.7).

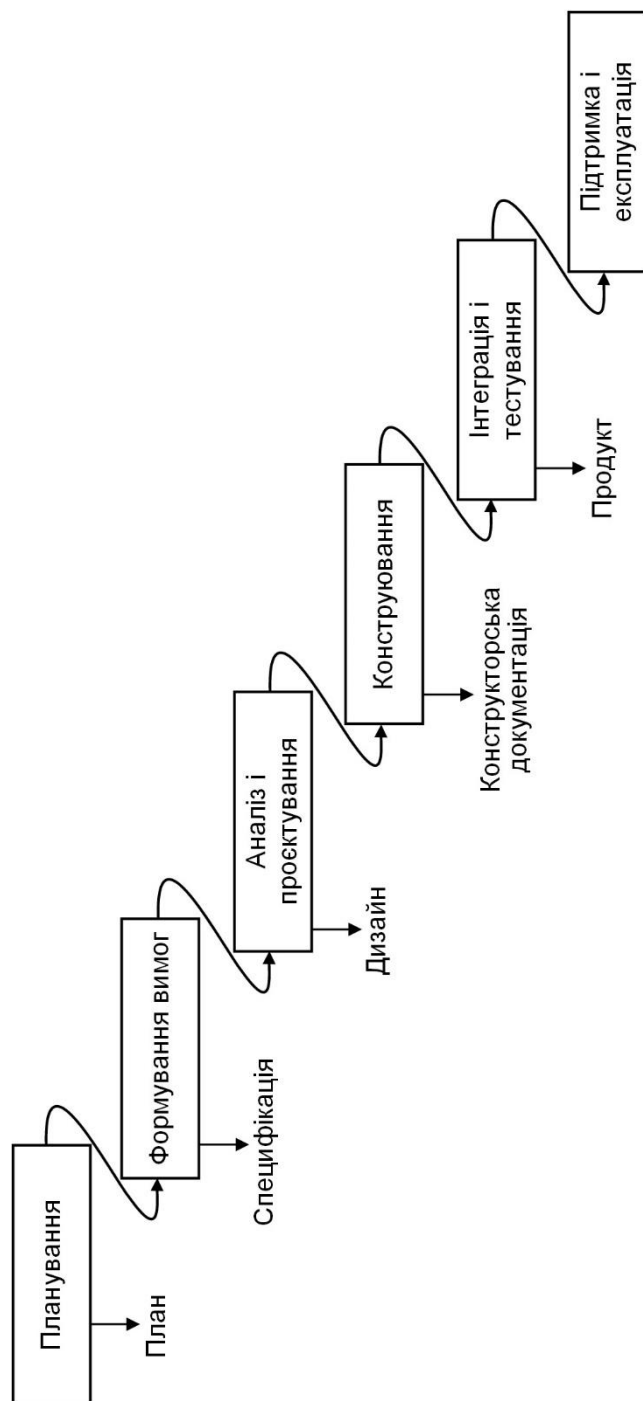


Рис. 2.7. Візуальне подання моделі життєвого циклу системи «водоспад/каскад» [3, 49].

Хоча, якщо слідувати логіці моделі «водоспаду/каскаду», то повернення із нижчестоящих стадій до вищестоящої ця модель не передбачає. У реальному житті все складніше. Досить часто, перебуваючи на стадії «конструювання», виявляються нові факти, що вимагають повернення на попередню чи попередні стадії.

Приклад. Під час створення Ан-124 «Руслан», за результатами конструкторсько-технологічних випробувань вже на стадії виробництва, виникла необхідність заміни раніше передбаченого у проєкті сплаву Д16 «Ковочний» на інші алюмінієві деформовані сплави. Це спричинило необхідність проведення додаткових випробувань на міцність, внесення існуючих змін до конструктивно-технологічної документації, що спричинило великі додаткові витрати ресурсів, у тому числі – часу.

Відома так звана «горбата» (RUP) модель представлення управління життєвим циклом та управління роботами, опублікована у 1996 році [3, 50] (рис. 2.8).

Ще в 1978 році Баррі Боем (Barry Boehm) запропонував, а в 1988 році [3, 51] опублікував зовсім іншу, принципово нову, так звану «спіральну» модель життєвого циклу системи. У ній метод опису робіт – стадій, розташованих за шкалою часу, був замінений на подання тих чи інших практик робіт, згорнутих по спіралі і періодично повторюваних і таким чином таких, що піддаються ітерації (рис. 2.9).

Ця модель подавала роботи, що йдуть на різних рівнях спіралі, такими, що постійно проходять через ті самі практики (1 - 7 типів). Так, у явному вигляді, спірально **відображалася ідея використання постійних ітерацій створюваної системи**. На кожній ітерації, і це передбачалося заздалегідь моделлю, могли з'явитися нові деталі, які змінювали функціональність системи.

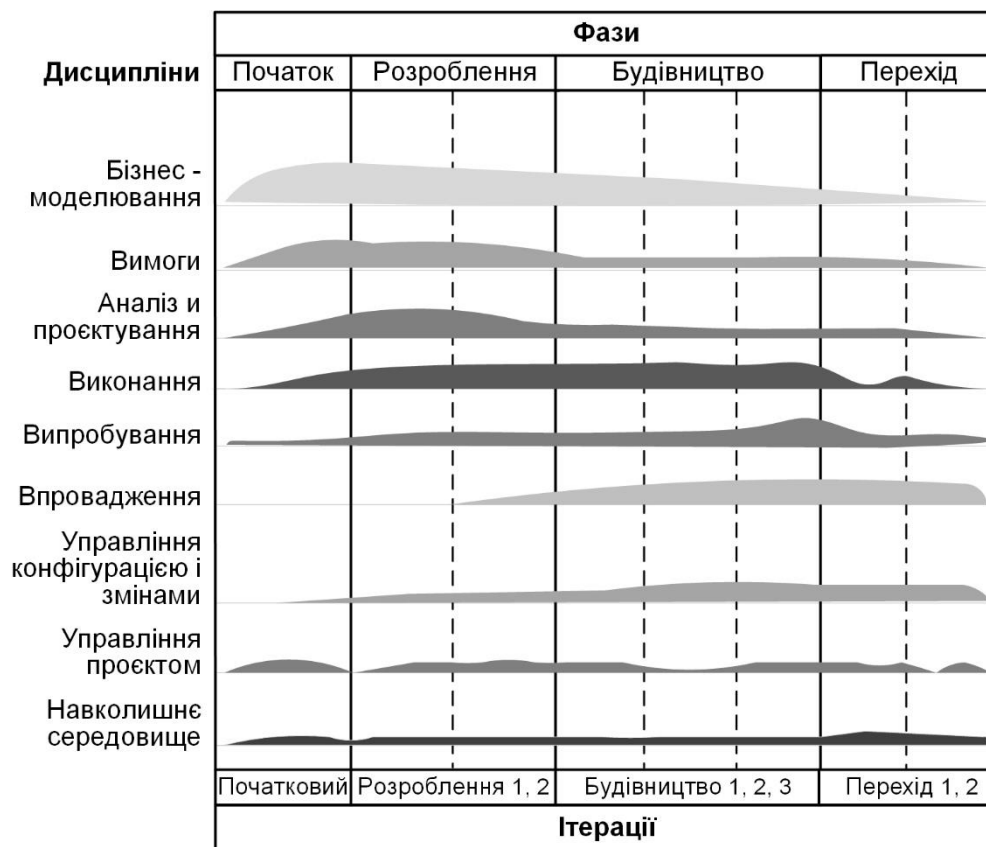


Рис. 2.8. «Горбата» модель «RUP» управління життєвим циклом та управління роботами [3, 50].

Система на кожному витку спіралі розроблялася не з нуля, а з підсумків попередньої ітерації. Причому могло виявитися, що потреба у наступній ітерації могла й відпасти, якщо розроблення *системи* явно заходила до «глухого кута».

У цьому поданні **моделі життєвого циклу** також запроваджено поняття «ітерації» за всіма її фазами, а також наочно видно неоднорідність розподілу різних типів робіт – процесів (вертикальна шкала) за фазами проекту.

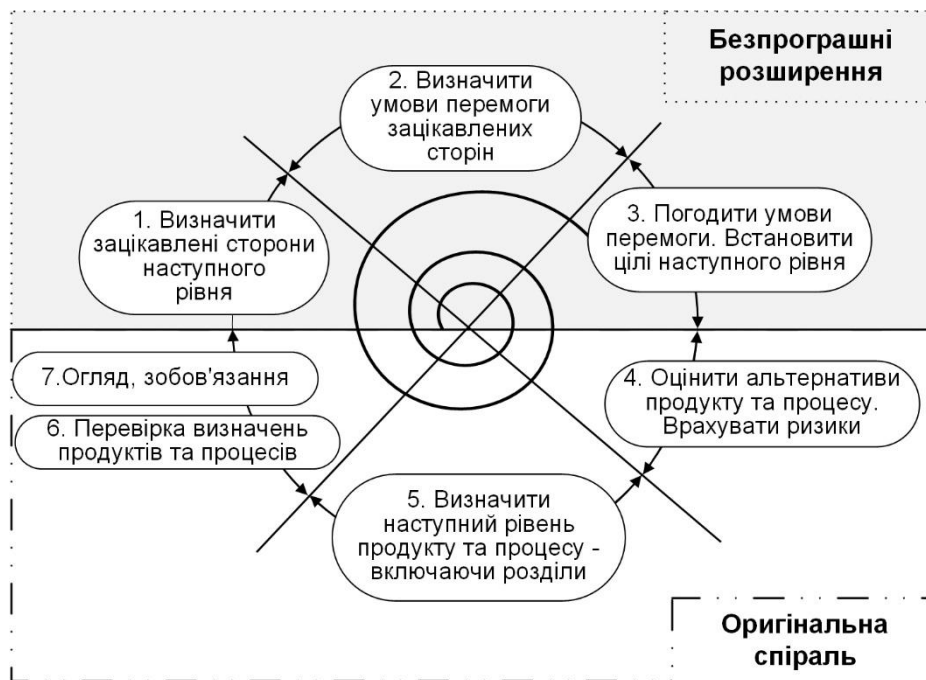


Рис. 2.9. Рання версія (1978 – 1988 роки) спіральної діаграми моделі життєвого циклу системи [3, 51].

У новій версії «спіраль нової діаграми», що з'явилася в 2006-2014 роках, яка називалася «модель покрокового спірального виділення ресурсів» (рис. 2.10), [3, 52], все більш явно проявляється спроба розібратися із інтерфейсом між менеджментом (управління проектом) і *системною інженерією*. Тут очевидніше поданий життєвий цикл, як набір інженерних практик у функціональному розгляді: аналіз вимог, специфікація, проєктування, реалізація, інтеграція і лише у другу чергу менеджерський підхід.

Використовується так само один із різновидів «спірального» подання моделі життєвого циклу, в якому початок циклу починається не «зсередини» спіралі, а з її периферії (рис. 2.11) [6].

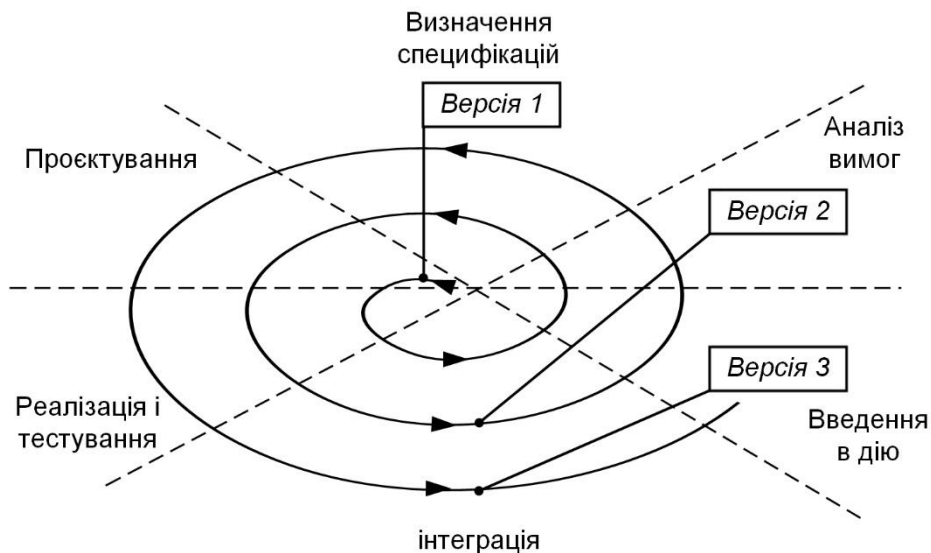


Рис. 2.10. Візуальне подання «моделі покрокового спірального виділення ресурсів» [3, 52].

«Спіральна» модель є 2-х мірним поданням життєвого циклу моделі системи. Зручним, за нашого погляду, є 3-х мірне – із урахуванням часу, подання життєвого циклу системи (рис. 2.12). У ньому основні, так звані практики – *передрозробка*, *розробка*, *построзробка* – позначені трьома секторами, а цикл розвитку показаний у вигляді «вихрової спіралі». Зменшення розмаху спіралі демонструє за часом матеріалізацію образу в матеріальну систему і потім її поступовий розвиток та дематеріалізацію.

Ще одним поширеним, популярним візуальним поданням життєвого циклу є так звана «V-діаграма», запропонована в 1991 році Kevin Forsberg [3, 53]. Це, по суті, лінійна діаграма життєвого циклу, перегнута у місці переходу системи із віртуального у фізичний стан (рис. 2.13).

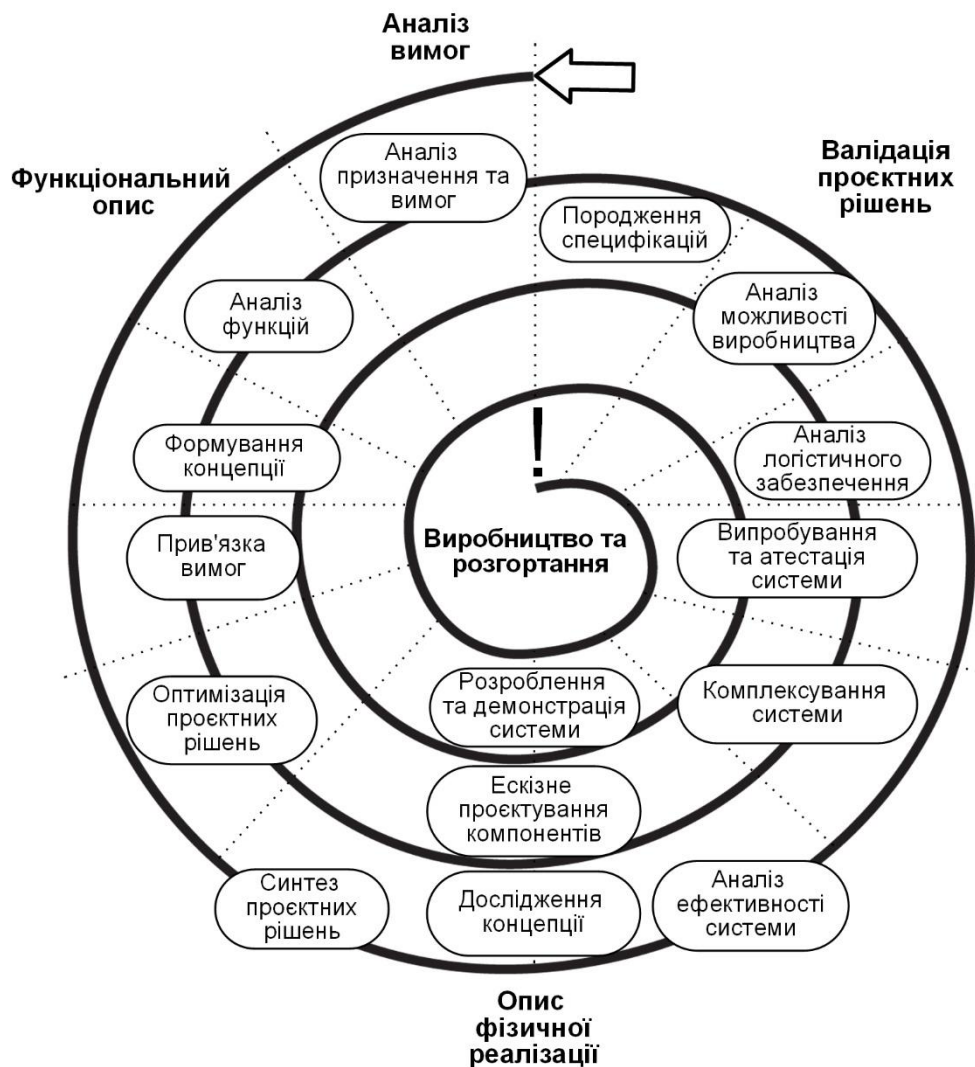


Рис. 2.11. Одна із версій «спіральної» моделі життєвого циклу системи [6].

Перегин «лінії часу» підкреслює його «логічне» подання, а не послідовне. На діаграмі легко виділяються три логічні стадії розвитку системи.

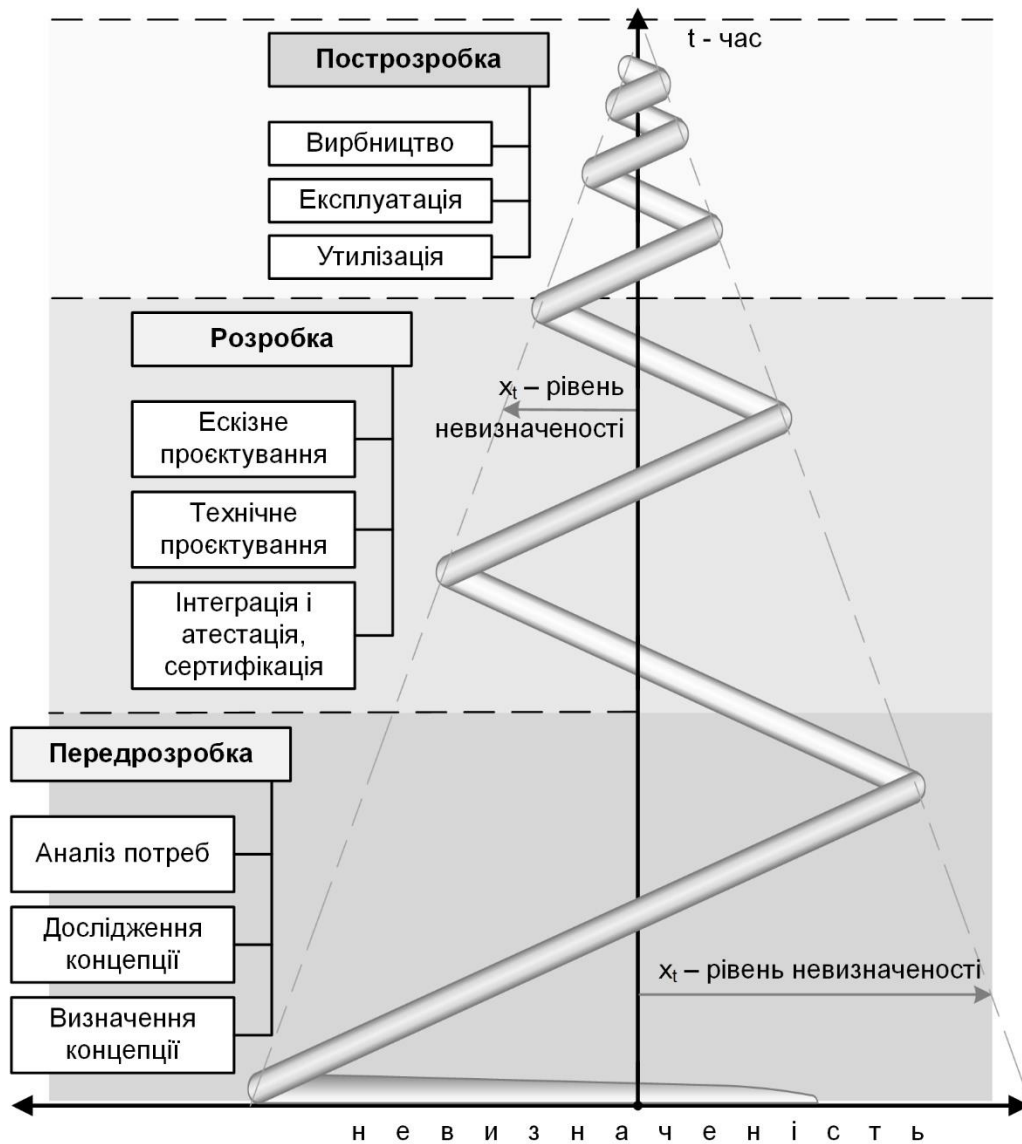


Рис 2.12. «Спірально-вихрова» тривимірна модель, яка демонструє зміну невизначеності за стадіями розвитку системи із урахуванням часу.

Перша – стадія опису системи, коли фізичної системи ще немає, а йде накопичення її опису, це так звана робота із

інформацією – із «бітами». У місці перегину починається друга стадія втілення системи. Це фізичне втілення і навіть передбачаються систематичні перевірки інформаційної та фізичних форм її реалізації. У результаті в ранніх версіях V-діаграм третьою останньою стадією було «приймання в експлуатацію». У пізніших версіях додали і саму «експлуатацію». Звернемо увагу, що у V-діаграмах показаний не повний життєвий цикл, відсутня стадія виведення із експлуатації.

У ще одній із версій V-діаграми за рахунок більшої товщини її лівої гілки наочно представляється «насиченість» «дофізичної» – інформаційної стадії життєвого циклу (рис. 2.14) [3], а також особливо виділяються дві основні стадії її створення: «опис » та «втілення».

Цим наголошується на більшій кількості роботи зі стадії «Опис системи»: аналітика, прогнозування, моделювання, що може сприяти зменшенню робіт із фізичними об'єктами.

Приклад. Один із загальновідомих прикладів. Переведення проєктування конструкторської документації літака Boeing 777 у цифрову форму – у форму цифрових моделей. Це дозволило одночасно покращити моделєпридатність конструкції, виключивши або зменшивши до мінімуму виготовлення фізичних об'єктів для експериментів, та перевести виготовлення на автоматизоване устаткування, що забезпечує більшу точність та меншу кількість помилок, які найчастіше допускав оператор.

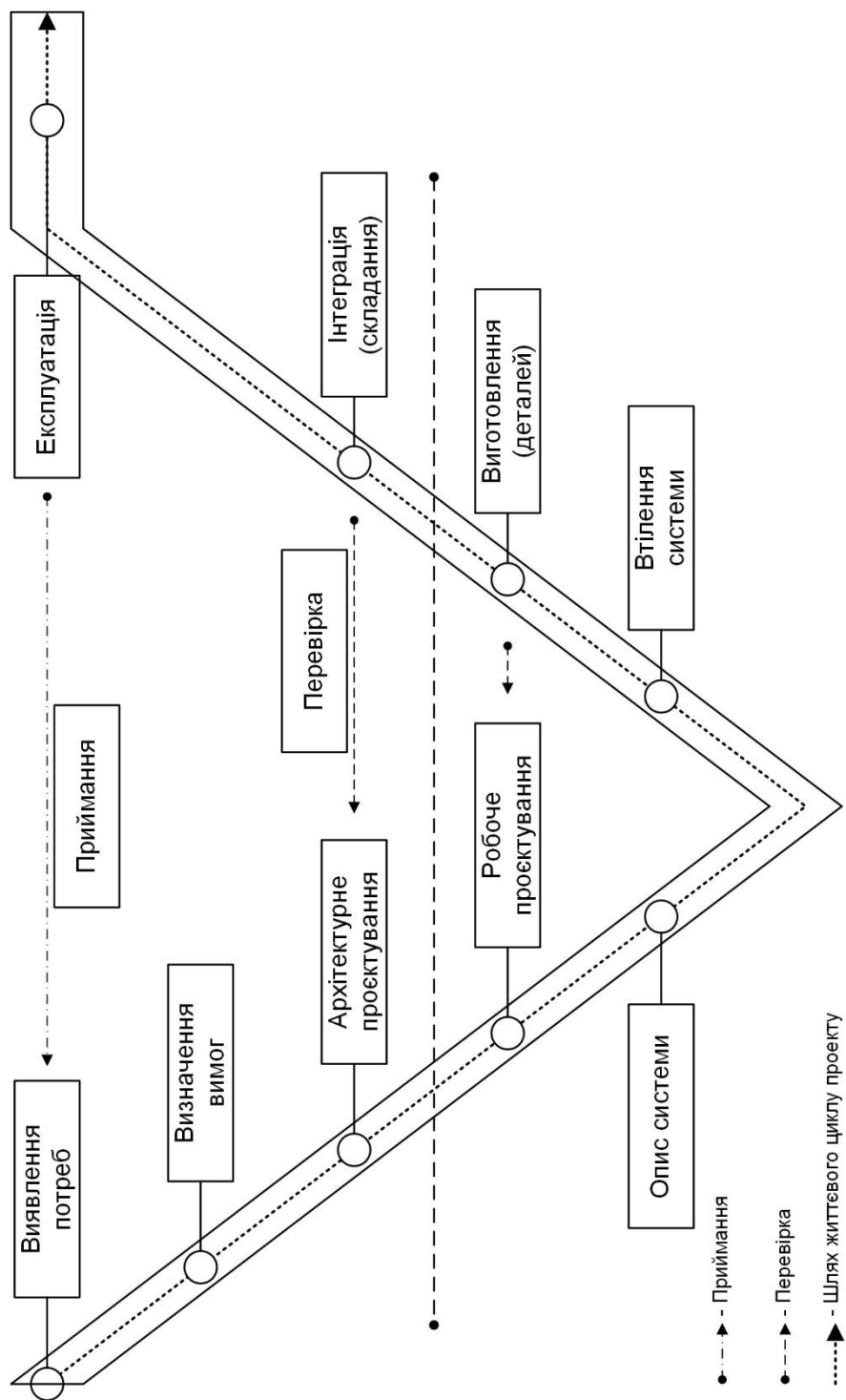


Рис. 2.13. Візуалізація подання V-діаграми життєвого циклу [3, 53].

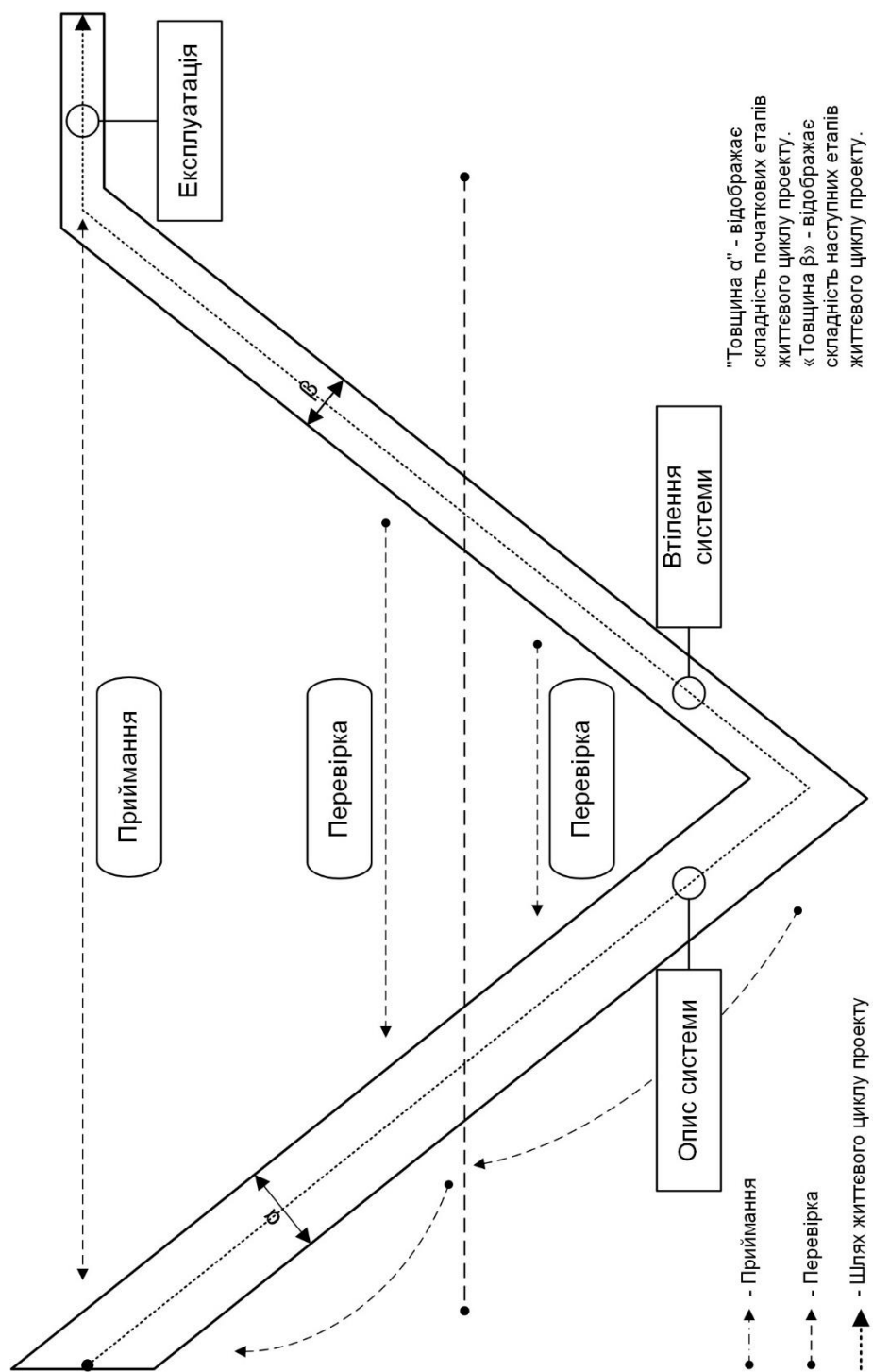


Рис. 2.14. Одна із версій V-діаграми з вираженими стадіями «опис системи» та «втілення системи» [3].

Всі раніше наведені візуалізовані моделі життєвого циклу складних систем свідчать про постійний розвиток уявлень про них. У пізніших моделях у явному вигляді показано 5 – 9 стадій, підкреслюється циклічність, гнучкість та головне уловлюється тенденція – зосереджувати основні зусилля системних інженерів на етапі «опису системи», тим самим розвиваючи інтелектуальну групу робіт за рахунок аналітичних прогнозів, моделювання системи.

В останньому, за часом публікації, міжнародному стандарті ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2] та його аналогах ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016 [1] та ГОСТ Р 57193-2016 [54] відійшли від візуального подання етапності розвитку життєвого циклу систем. Вони просто перелічені: 1 – Осмислення потреб у системі; 2 – Реалізація системи; 3 – Експлуатація; 4 – Розвиток; 5 - Списання. Тут увагу користувача зосередили на виявленні та описі найбільш загальних практик життєвого циклу системи. Усі процеси–практики створення системи поділені на 4 групи:

- **Перша** – процеси угод щодо закупівлі та постачання. З цього починається фізичне здійснення системи.
- **Друга** – організаційно-управлінські процеси.
- **Третя** – процеси технічного управління – відносяться до забезпечення створення системи.
- **Четверта** – це, власне, технічні процеси, які відносяться до перетворення системи, що розглядається (табл. 2.4).

Таблиця 2.4. Процеси життєвого циклу системи, об'єднані у чотири групи [1].

Процеси життєвого циклу системи			
Процеси угоди	Процеси організаційного забезпечення проєкту	Процеси технічного управління	Технічні процеси
Процеси угоди	Процеси управління моделями життєвого циклу	Процеси планування проєкту	Процеси аналізу бізнесу або місії
Процеси постачання	Процеси управління інфраструктурою	Процес управління та оцінювання проєкту	Процес визначення потреб і вимог зацікавлених сторін
	Процеси управління портфоліо	Процес управління прийняття рішень	Процес визначення вимоги до системи
	Процеси управління людськими ресурсами	Процес управління ризиками	Процес визначення архітектури
	Процеси управління якістю	Процес управління конфігурацією	Процес проєктування
	Процеси управління знаннями	Процес управління інформацією	Процес системного аналізування
		Процес вимірювання	Процес імплементації
		Процес забезпечення якості	Процес інтеграції
			Процес верифікації
			Процес передавання
			Процес валідації
			Процес експлуатації
			Процес технічного обслуговування
			Процес списання

Завдяки цьому стандарту вважається, що можна легко перевірити, наскільки те, чим ви займаєтеся, є системною інженерією. Якщо виконуються ці практики-процеси, то так, якщо ні, це проста інженерія. При цьому слід завжди пам'ятати, постійно мати на увазі, що у стандарті представлений, щонайменше, не оптимум, а максимум можливого складу процесів-практик. У реальному житті необхідно зрозуміти, що зайве виконання процесів завжди є затратним. Тому стандарт можна використовувати як рекомендацію, пристосовуючи його до проєктів. Один із сьогоденних трендів ранніх стадій вироблення проєктних рішень: «антиперфекціонізм» - «беріть лише той мінімум, який дійсно необхідний», «не цільтеся в десятку, цільтеся в мішень» - особливо на ранніх стадіях проєкту не намагайтеся спочатку проєкту отримати якомога більшу ясність; «залишайте перфекціонізм для пізніших стадій».

Враховуючи, що майже всі оборонні системи належать до категорії складних інженерних систем, звернемо увагу на подання життєвого циклу систем у цій специфічній галузі діяльності.

Так, наприклад, у вітчизняному стандарті ДСТУ В-П 15.004:2019 [41], який багато в чому базується на відповідних нормативах НАТО: AAR-20 [36], AAR-48 [37], наводиться три різні можливі моделі подання життєвого циклу виробів озброєння та військової техніки: лінійної, ступінчастої та рекурсивної (табл. 2.5–2.6), при цьому всі моделі описують 6 стадій розвитку життєвого циклу систем.

У стандартах НАТО, які стосуються оборонної тематики НАТО: AAR-20 [36], AAR-48 [37] представлені 6 стадій

життєвого циклу та одна (Pre-concept), що передує життєвому циклу. Для порівняння наведено перелік стадій життєвого циклу та їх послідовність, викладені у відповідному стандарті: України – ДСТУ В-П 15.004:2019 [41], або Росії – ГОСТ РВ 15.103-2004 [55], ГОСТ РВ 15.004-2004 [56].

Підсумовуючи, представляється корисним порівняти сучасне подання життєвого циклу складних інженерних систем, відображене у ряді популярних та міжнародних нормативних документів у галузі військової та цивільної техніки (табл. 2.5–2.7).

Незважаючи на деякі відмінності в найменуваннях стадій життєвого циклу систем, які визначаються, ймовірно, особливостями сутностей систем, їх областями застосування, рівнями складності, загальні підходи до подання життєвого циклу систем залишаються єдиними.

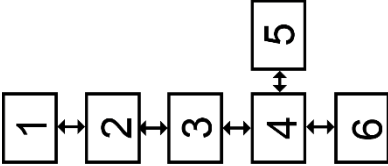
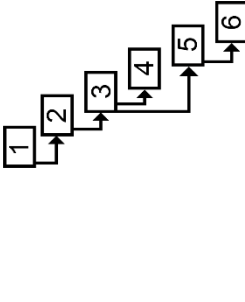
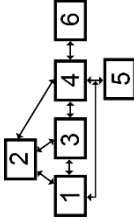
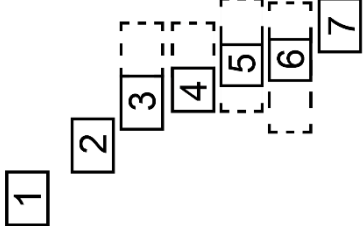
У нашому випадку мається на меті обрати те подання життєвого циклу системи, яке дозволяє найбільшою мірою виявляти участь системного інженера в роботі з її створення, а також відобразити різницю і основну специфіку його діяльності на ранніх стадіях цієї роботи. Найбільшою мірою цій меті відповідає підхід, викладений у класичному підручнику [6], де виділяються три головні стадії, які відрізняються за типом і характером роботи системного інженера, а також, які характеризуються трансформацією системи із одного в інший матеріальний стан. Цей підхід певною мірою використаний нами у подальшому викладі.

Наявні відмінності від інших загальноприйнятих підходів у поданні стадій, етапів, фаз розвитку системи пояснюватимуться під час розгляду матеріалу.

Таблиця 2.5. Порівняння текстового подання життєвого циклу виробів у нормативній документації у галузі військової техніки.

Нормативні документи у галузі військової техніки			
Міжнародний: NATO STANDARD: AAP-20 [36]; AAP-48 [37].	Україна: ДСТУ В-П 15.004:2019 [41], замість ГОСТ В 15.004-84 [40].	Росія: ГОСТ РВ 15.103-2004 [55].	Росія: ГОСТ РВ 15.004-2004 [56].
Текстове подання стадій:	Текстове подання стадій:	Текстове подання стадій:	Текстове подання стадій: (передбачено для особливо складних систем). Порядок виконання аванпроекту:
1. Pre-concept	1. Задум	1. Дослідження та обґрунтування розробки	1. Розроблення проекту ТТЗ (ТЗ) на ДКР із створення системи. Разом 29 позицій заходів.
2. Concept	2. Розроблення	2. Розробка	2. Створення макету моделі зразка для експериментальної перевірки можливості забезпечення ТТХ системи.
3. Development	3. Виробництво	3. Виробництво	3. Передача на наступну стадію для використання: під час формування ТТЗ (ТЗ) в проектній документації ескізного, технічного и робочого проектів.
4. Production	4. Використання	4. Експлуатація	
5. Utilization	5. Підтримка	5. Утилізація	
6. Support	6. Вилучення	6. Капітальний ремонт (для підлягаючих ремонту)	
7. Retirement			

Таблиця 2.6. Графічне подання життєвого циклу виробів у нормативній документації у галузі військової техніки.

Нормативні документи у галузі військової техніки			
Міжнародний NATO STANDARD: AAP-20 [36]; AAP-48 [37].	Україна: ДСТУ В-П 15.004:2019 [41], замість ГОСТ В 15.004-84 [40].	Росія: ГОСТ РВ 15.103-2004 [55].	
Модель життєвого циклу виробу:	Модель життєвого циклу виробу:	Модель життєвого циклу виробу:	
 AAP-20	a)		
	б)		
	в)		
 AAP-48			

Таблиця 2.7. Порівняння подання життєвого циклу виробів у нормативній документації у галузі цивільної техніки.

Нормативні документи у галузі військової техніки	
Міжнародні стандарти: ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2]; ISO/IEC TR 24748-2:2011 [57].	Україна: ДСТУ 3974-2000 [58]. Росія: ГОСТ Р 58849-2020 [24].
Текстове подання стадій:	Текстове подання стадій:
1. Замовлення	0. Дослідження та обґрунтування створення зразка авіаційної техніки (АТ)
2. Розробка	1. Проектування
3. Виробництво	2. Підготовка и освоєння виробництва
4. Використання	3. Випробування та сертифікація
5. Підтримка	4. Серійне виробництво
6. Списання	5. Експлуатація
Модель життєвого циклу виробу:	6. Модернізація
1 2 3 4 5 6	7. Утилізація
Процеси можуть виконуватися: - послідовно; - ітеративно; - рекурсивно.	Довідка: На стадії «О» - маркетингові дослідження; формується концепція АТ; формується ТЗ на виконання технічної пропозиції. Модель ЖЦД системи. наведена в 2-х виконах, що свідчать про ітеративний та рекурсивний тип виконання процесів.

- **Модель життєвого циклу з позиції системного інженера**

Характерною особливістю останніх за часом моделей життєвого циклу систем є можливість, у міру розвитку системи, виявити суттєві переходи від одного виду діяльності системного інженера до якісно нового. Дуже укрупнено тоді можна уявити цю модель, як таку, що складається з трьох великих стадій, що, у свою чергу, можуть бути розбиті на 9 дрібніших етапів. Назви цих 3-х стадій, зручно визначати таким чином, щоб у них знайшли відображення найважливіші питання, що стосуються діяльності системного інженера, а саме: стадія *передрозробки*, стадія *розробки* основних інженерно-технічних рішень та стадія *построзробки*.

Наведена нами нижче (рис. 2.15) модель життєвого циклу системи багато в чому запозичена із моделі, запропонованої в роботі [6] – вона також складається з 3-х основних стадій робіт, але в ній скориговані та актуалізовані деякі терміни, доданий етап «утилізації системи».

Для зручності візуального сприйняття двох найважливіших для системного інженера сутностей матеріального стану системи використано «V-подібну» форму подання моделей життєвого циклу системи:

- «Опис» характеризується стадіями: *передрозробки* та *розробки*;
- «Втілення» характеризується стадією: *построзробки*;

Слід зазначити, що сутність матеріального стану системи, що позначено як «Опис», не варто розуміти буквально, оскільки на завершальних етапах система вже втілена в матеріальній формі у вигляді дослідного зразка, дослідної серії, дослідної партії, які пройшли натурні випробування і атестовані у встановленому порядку (табл. 2.6–2.7). Коректніше цю сутність було б позначити як «Подання» системи.

Загальноприйнятим є уявлення про те, що в процесі свого життєвого циклу система зазнає певних трансформацій, які пов'язують із підвищенням ступеня її матеріалізації і, у зв'язку з цим, зменшенням ступеню невизначеності в описі, Benjamin S. Blanchard, John E. Blyler «System Engineering Management»[59].

На першій стадії, названої «стадією *передрозробки*», система ще не має матеріального втілення і знаходиться у формі певних абстракцій, образів, інтуїтивних уявлень і лише до кінця цієї стадії формується її більш-менш явне подання, оформлене у вигляді цілого ряду документів та описів, склад яких, наприклад, для продукції військового та цивільного призначення, яка фінансується з держбюджету або інших видів централізованих бюджетів, досить суворо регламентований.

Друга стадія, яка названа «стадією *розробки*», характеризується поступовим підвищенням ступеня матеріалізації системи – від ескізного проекту до втілення її в демонстраторі, макеті, дослідному зразку, який має продемонструвати та підтвердити досягнення основних цільових показників системи.

Третя стадія – «стадія *построзробки*», на якій система досягає найвищого ступеня своєї матеріалізації - вона виготовляється за виробничою технологією в необхідному обсязі: серійно, масово

або в одиничних екземплярах. Вона матеріалізує свої споживчі властивості та якості в процесі використання або застосування та наприкінці цієї стадії система дематеріалізується – виводиться із експлуатації та утилізується.

На всіх цих трьох стадіях завдання, розв'язувані системним інженером, очевидно, сильно відрізняються як за своєю сутністю, так і за характером робіт. Докладно цей аспект буде висвітлено у наступних розділах.

Особливо велика відмінність у характері робіт спостерігається між першою, другою та, окремо, третьою стадією, на якій роль системного інженера залишається суттєвою, але характер його діяльності, тип та обсяг робіт сильно відрізняються.

Для зручності надалі називатимемо подану на рисунку 2.15 модель – адаптованою до спеціалізації системного інженера моделлю життєвого циклу системи.

Зазначимо окремо, що ця модель адаптована до спеціалізації системного інженера, структура викладу матеріалу в наступних розділах нашого навчального посібника багато в чому базуються на методології, базових термінах та визначеннях, наведених у найкращих, на наш погляд, підручниках з тематики системної інженерії, авторів Олександра Косякова та ряду інших: Вільям Н. Світ, Семюель Дж. Сеймур, Стівен М. Бімер.

Там, де матеріал вимагав актуалізації, урахування вітчизняного досвіду та відповідних практик, автори вносили відповідні доповнення та корекції.

Там, де це вважається доречним, автори фокусують увагу читачів на порівнянні вітчизняних практик та методів створення складних наукоємних виробів із підходами, рекомендованими у

вищенаведених підручниках. Автори ставили завдання максимально можливою мірою адаптувати викладений матеріал до сприйняття сучасного розробника складних інженерних систем.

• **Метод вироблення проєктних рішень у системній інженерії**

Для того, щоб успішно та ефективно створювати складні інженерні системи, необхідно мати методологічний апарат, інваріантний, власне, до типу, виду самої системи. У роботі [6] запропонований такий, досить вдалий, на наш погляд, **метод вироблення проєктних рішень**, який може використовуватися на всіх стадіях життєвого циклу складних інженерних систем, незалежно від їх типів та видів. Сутність його, коротко полягає в тому, що по-перше, в рамках всіх 3-х стадій життєвого циклу системи (*передрозробки, розробки, построзробки*) і, відповідно 9 етапів цих стадій, послідовно і повторюючись на кожному наступному етапі виконуються в тій чи іншій формі наступні чотири процедури:

- здійснення аналізу вимог;
- розроблення функціонального опису реалізації вимог;
- опис фізичної реалізації вимог;
- валідація вибраних проєктних рішень (табл. 2.8).

По-друге, як у рамках кожного етапу, так і між стадіями передбачені ітеративні процедури, що забезпечують «налаштування», корекцію та внесення змін. На всіх етапах та стадіях реалізується так званий принцип «неостаточних» рішень (рис. 2.16).

Таблиця 2.8. Типові процедури методу вироблення проєктних рішень у системній інженерії.

Аналіз вимог	Функціональний опис	Опис фізичної реалізації	Валідація проєктних рішень
- Збір отриманих на попередньому етапі, узагальнення всіляких вхідних даних: вимог середовища, стейкхолдерів, умов та часових інтервалів прийняття рішень (гейтів); - Формулювання на високому рівні відповідей на запитання «Навіщо?», «Чому?» у термінах потреб, цілей; - Ітеративна корекція виявлених невідповідностей; - Конкретизація вимог у формальній, критеріальній формі.	- Трансформація вимог попереднього етапу (стадії) до функціональної форми (з форми: «Навіщо?», «Чому?» у форму «Що робить?» - робіт); - Декомпозиція вимог щодо окремих функціональних елементів, які можуть бути, в принципі, реалізовані фізично; - Подання взаємодії між функціональними елементами.	- Виявлення та відбір пріоритетного науково-обґрунтованого методу прийняття рішення, що враховує баланс показників функціонування із термінами, ресурсами та ризиками; - Виявлення та відбір альтернативних компонентів системи, що фізично реалізуються, які дозволяють ефективно забезпечити взаємодію між її елементами.	- Побудова адекватних вимог «моделей оточення» системи (імітаційні, математико-логічні, фізичні); - Дослідження та випробування проєктних рішень на моделях; - Виявлення неузгодженостей проєктних рішень із моделями та їх улаштуванням, у тому числі за рахунок можливих ітерацій.

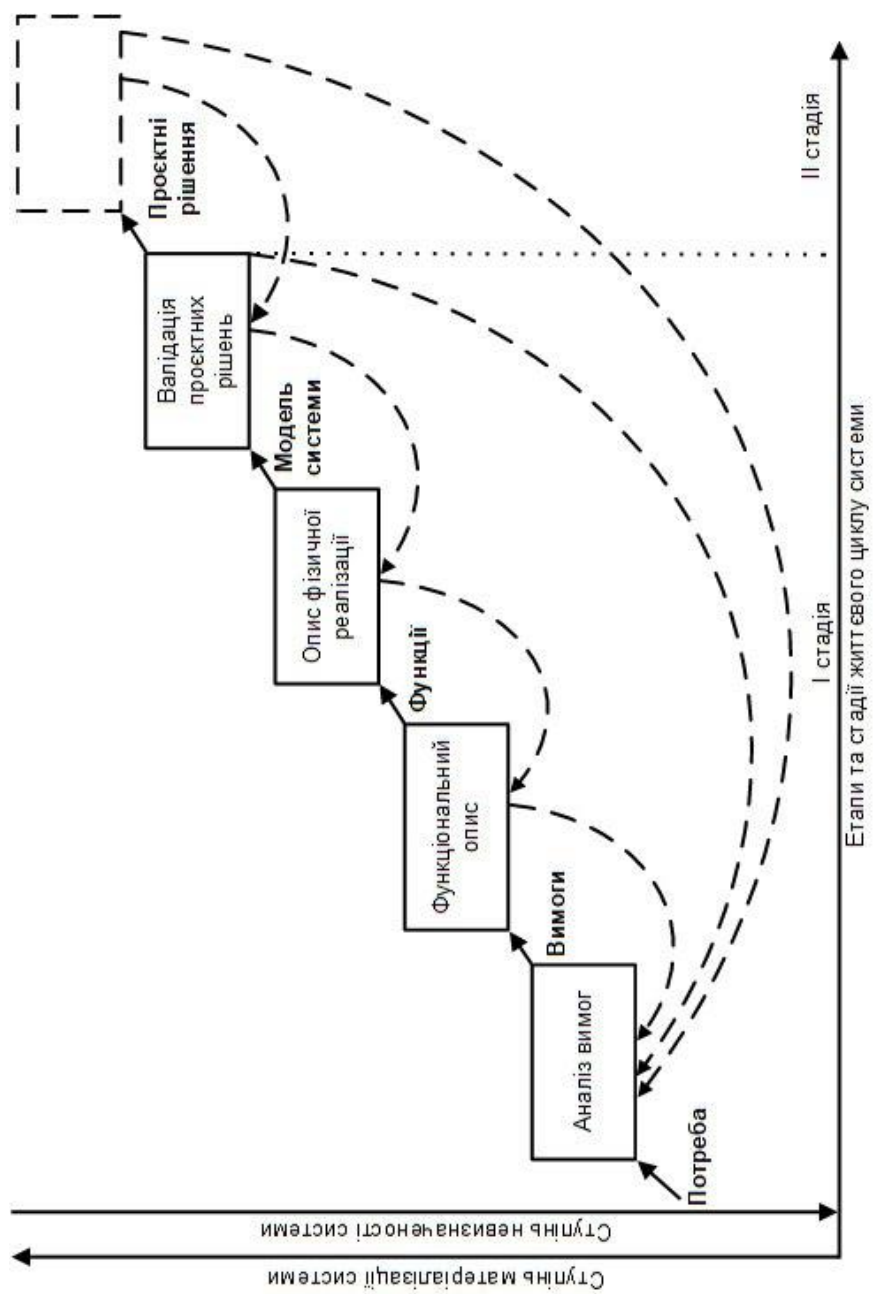


Рис. 2.16. Спрощена схема сутності методу вироблення проєктних рішень у системній інженерії.

• Стадія передрозробки нової системи

Стадія *передрозробки* – охоплює ранній період формування майбутньої *системи*. Виходячи, по-перше, з вимог надсистеми – так званих *потреб*, які можуть бути сформульовані у явному вигляді – якщо є потенційний замовник чи можуть бути виявлені, визначені самим майбутнім розробником системи із урахуванням маркетингових досліджень, прогнозних оцінок, інших аналітичних інструментів. По-друге, спираючись на існуючу або знов виникаючу принципову технологічну можливість (рис. 2.17).

Головними цілями, які мають бути досягнуті на стадії *передрозробки*, вважаються такі:

- визначити наявність явно вираженої *потреби* у новопропонованій до *розгляду системи*, оцінити ринок цієї потреби, період активації цієї потреби, а також технологічні та економічні можливості створення системи, яка задовольняє ці потреби;
- розглянути та дослідити можливі варіанти концепції системи, виявити, сформулювати, отримати схвалення *складу основних вимог до неї*, вибрати найкращий із можливих варіантів концепції системи, представити план розроблення, виробництва та введення її в експлуатацію.
- розробити або знайти постачальників нових технологій, що дозволяють реалізувати прийняту концепцію і переконатися, що вони зможуть задовольнити вимоги, що висуваються до неї.

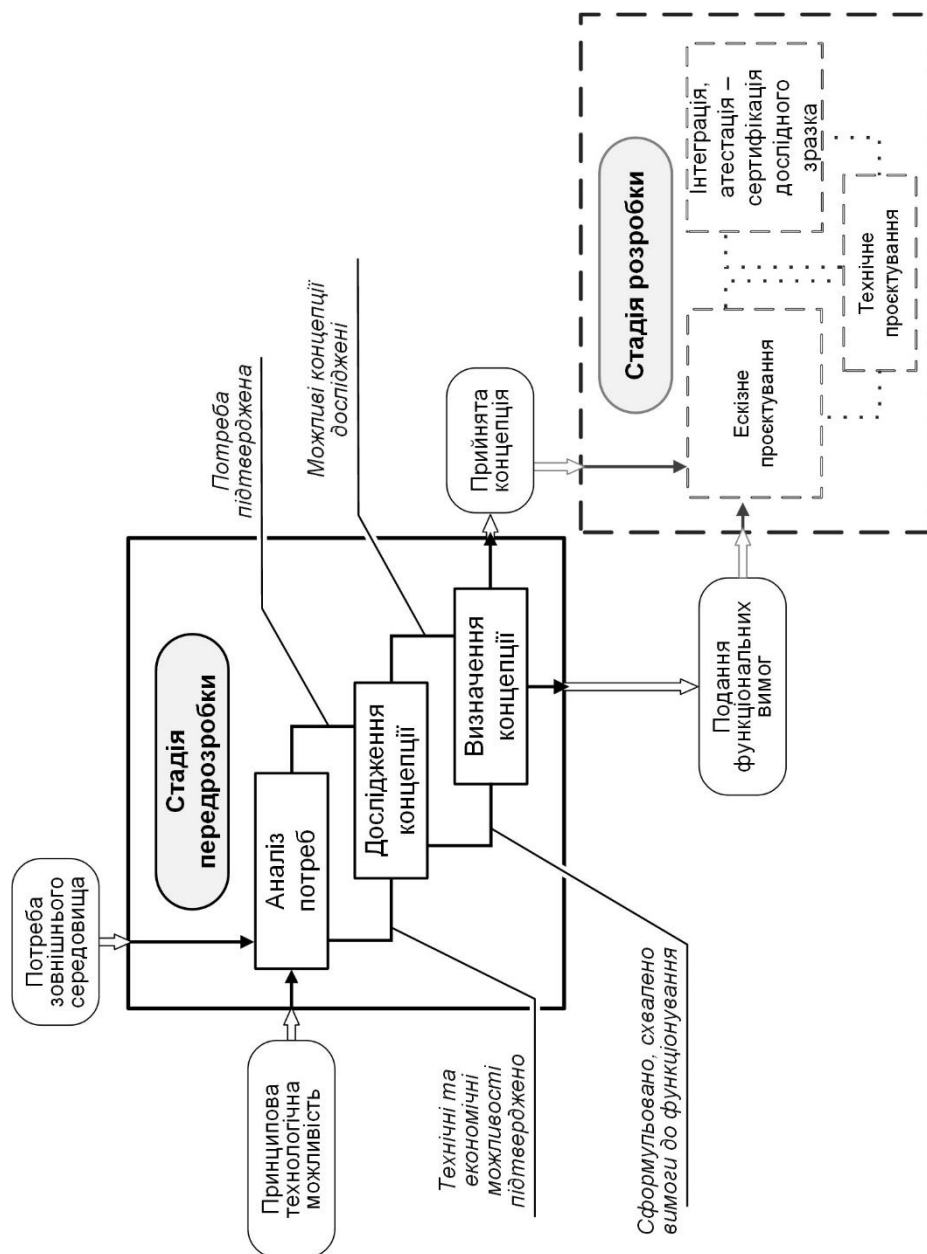


Рис. 2.17. Подання та типовий склад етапів стадії передрозробки системи.

Звернемо увагу, що близькі або аналогічні дії – процеси передбачені у раніше згадуваних міжнародних та національних нормативних документах:

- ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2] у стадії «Осмыслення потреби в системі»;
- NATO: AAR-20 [36], AAR-48 [37] у стадії «Pre-concept» та «Concept» відповідно.

У низці актуальних національних спеціалізованих нормативних документах передбачені аналогічні чи близькі їм за змістом стадії.

Наприклад, у національному стандарті ДСТУ В-П 15.004:2019 [41] цю найпершу стадію називають «задум», який у свою чергу складається із 4-х етапів:

- Перший із них належить до компетенції «Замовника» – Міністерства Оборони та включає *визначення потреби в системі*, яка в даному стандарті називається «*виробом*». Там, окремо пояснюється правомочність «*Вироби озброєння та військової техніки*» називати системою із відповідними посиланнями на ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2]; NATO: AAR-20 [36], AAR-48 [37].
- Інші три етапи цієї стадії відносяться до компетенції «Виконавця» роботи. Для складних виробів, розроблення яких потребує вирішення комплексних науково-дослідних робіт, значних матеріальних та фінансових витрат, передбачається окремий спеціально регламентований етап – «Аванпроект» у складі цієї стадії.

У відповідному стандарті Російської Федерації ГОСТ РВ 15.004-2004 [56] ця сама рання стадія життєвого циклу називається: «Дослідження та обґрунтування розробки»,

складається вона із 3 етапів, близьких за змістом і основним сутностями до наведених у раніше згаданому ДСТУ В-П 15.004:2019 [41]. У російському стандарті відсутня 4-й етап цієї стадії – «формування вимог до програми (проєкту) створення виробу». Відсутність цього розділу можна пояснити мабуть тим, що в окремому російському стандарті присвяченому спеціально виконанню «Аванпроєкту» ГОСТ РВ 15.103-2004 [55] подібна робота передбачена також окремим розділом і називається вона таким чином: «розробка проєкту ЄСП виконання ДКР відповідно із ГОСТ В 15.208-82 [30], взаємопов'язаного за термінами виконання ДКР загалом та її СЧ. У проєкті вказують виконавців ДКР, у тому числі технологічних НДІ, виробників дослідних зразків виробу ВТ, серійних виробів та їх СЧ; терміни виконання етапів ДКР, у тому числі всіх видів випробувань, місце їх проведення та, за необхідності, перелік наукових досліджень (в тому числі із технічних проблем та питань), що підлягають виконанню під час проведення ДКР для забезпечення створення конкретних виробів».

Ще однією істотною відмінністю стандарту ГОСТ РВ 15.103-2004 [55] від відповідного ДСТУ В-П 15.004:2019 [41], який стосується ранньої стадії розроблення, є пряма вимога до виготовлення макетів, моделей, експериментальних зразків у складі науково-дослідних робіт цієї стадії.

Істотною відмінністю подання адаптованої для системного інженера моделі життєвого циклу від наведених нормативних документів є своєрідна «примусова» ітерація процесів аналізу вимог, визначення вимог, валідації вимог на різних етапах стадій життєвого циклу системи.

Цікавим представляється ознайомитися із деякими сучасними особливостями формування ранніх стадій розроблення концепції етапу, який відноситься до аналізу потреб: передзакупівельна стадія – А, В та закупівля системи – С, прийнятому в МО США та раніше вже наведеними в Розділі 1, рисунок 1.21.

Обсяг робіт, що припадають на системних інженерів на цій стадії відносно невеликий, він має аналітичний, експертно-оцінний характер. Типовою його особливістю є постійні контакти, консультації, погодження, запити даних із надсистеми вищої ієрархії, відносно *системи, що розглядається*. Але «ціна» прийнятих рішень та можливі ризики на цій стадії найвищі (рис. 2.18).

• Стадія розробки нової системи

Наступною у життєвому циклі системи є стадія *розробки*. Тут розробляються та приймаються основні рішення, які мають забезпечити виконання функцій системи, специфікованих у раніше прийнятій концепції та реалізовані у фізичній конструкції системи, під час її виробництва, експлуатації та утилізації, при цьому має забезпечуватися економічна ефективність її життєвого циклу.

На цю стадію припадає максимальний обсяг робіт *системної інженерії* (рис. 2.19). Основні завдання, що вирішуються у цій стадії: керівництво розробленням інженерно-технічних рішень та проєктуванням, особлива увага має приділятися формуванню інтерфейсів різних типів та видів робіт – процесів; керівництво програмами випробувань, розробленням методів випробувань, прийняття рішень для корекції у роботах та в самій системі.

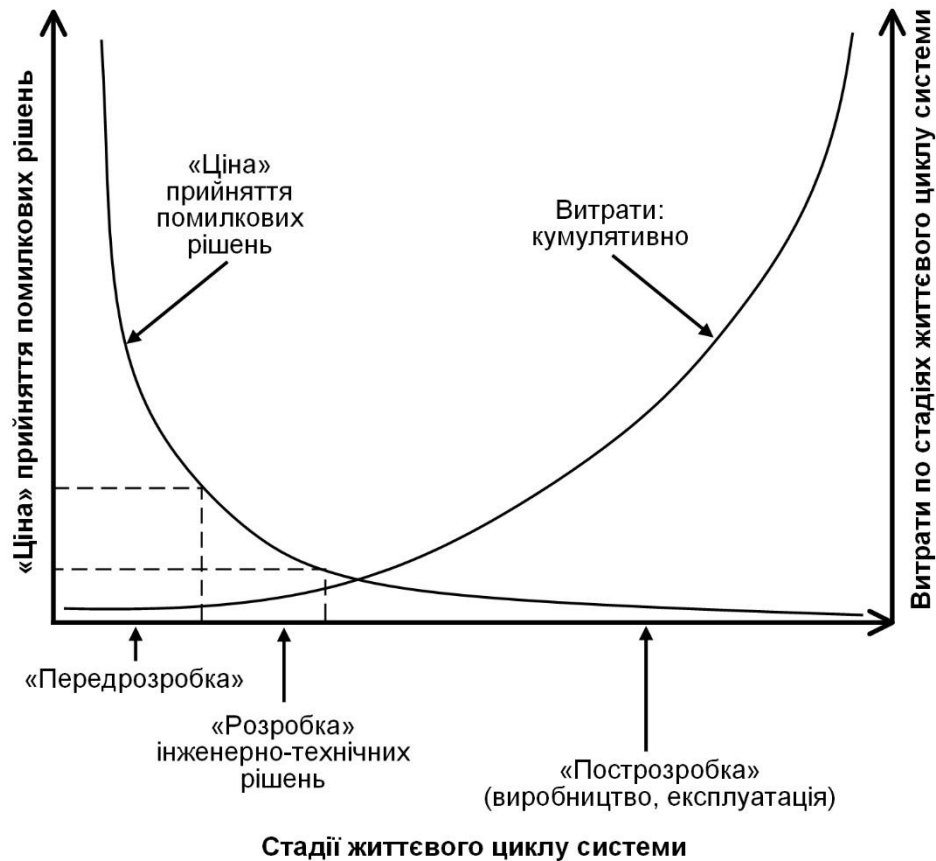


Рис. 2.18. Загальноприйняте подання важливості стадії передрозробки системи та «ціни» помилкових рішень, які на цій стадії приймають.

Головні цілі, які мають досягатися на цій стадії – такі:

- забезпечити інженерно-технічне розроблення системи – робочої моделі, прототипу, яка задовольняє основним сформульованим функціональним вимогам, а також вимогам щодо надійності функціонування, ремонтпридатності та безпеки;
- підтвердити економічну доцільність виробництва, експлуатації та утилізації розробленої системи.

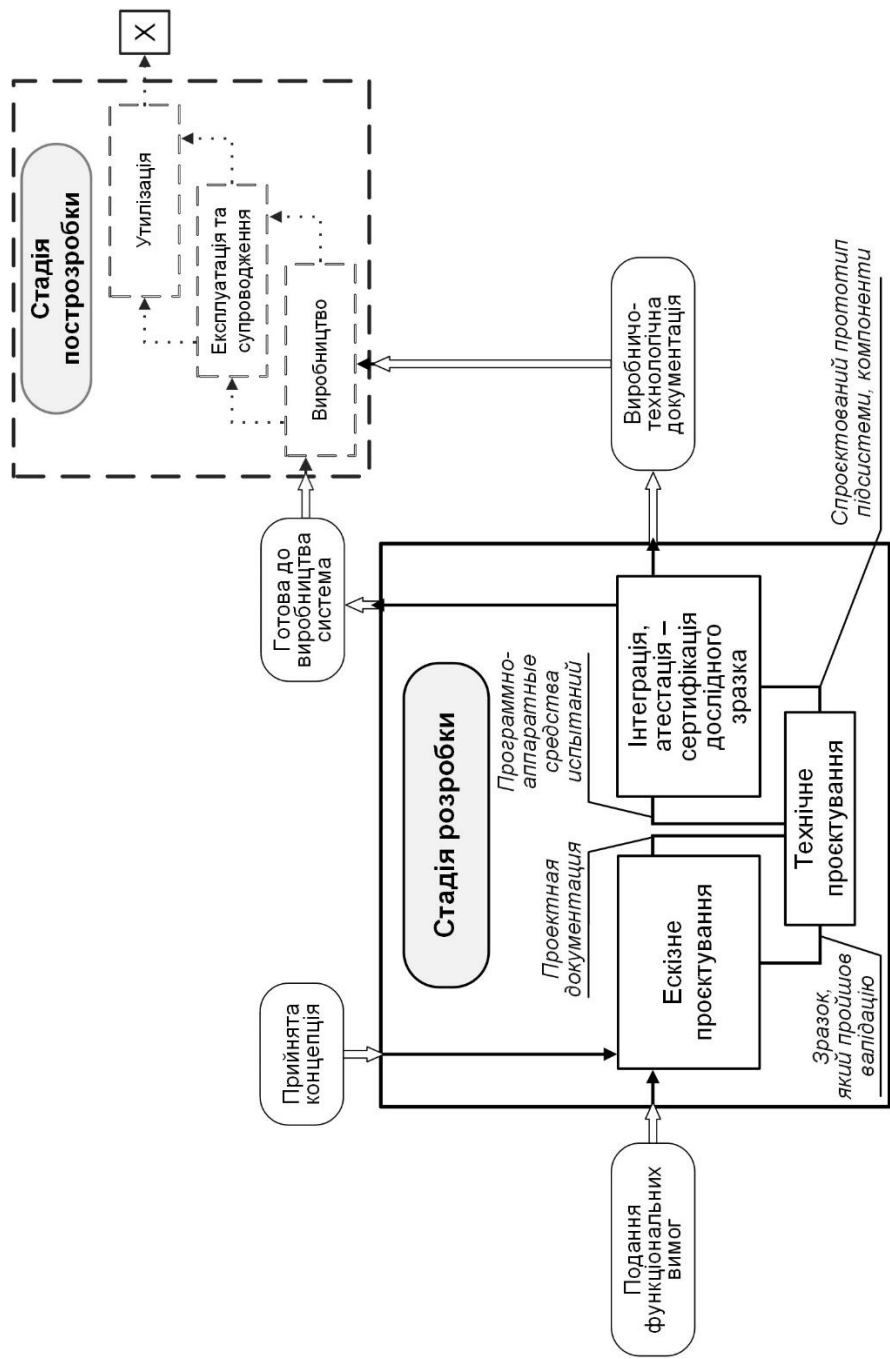


Рис. 2.19. Подання та типовий склад етапів стадії розробки системи.

Слід зазначити, що, як це наведено у рисунку 2.19, у зарубіжній літературі не завжди прийнято виділяти і розділяти етап технічного проєктування і наступний за ним етап розроблення робочої документації – робочий проєкт. У нинішній та минулій вітчизняній практиці створення складних інженерних об'єктів – так званих виробів чи систем, навпаки, регламентується після етапу «технічного проєктування» включати окремо етапи «розроблення робочої конструкторської документації» для виготовлення дослідного зразка системи, далі слідує етап – «виготовлення дослідного зразка системи», «проведення попередніх випробувань», «коригування конструкторської документації», «доопрацювання дослідного зразка», «корекція робочої конструкторсько-технічної документації за наслідками доробок» – ДСТУ 3278-95 «Система розроблення та постачання продукції на виробництво. Основні терміни та визначення» [60].

Для систем озброєння та військової техніки, які розробляються за рахунок коштів держбюджету – за держзамовленням, прийняті та ще ретельніше регламентуються процедури допуску дослідного зразка системи або її дослідної партії до серійного виробництва. Крім вже наведених вище етапів, якщо це викладено у вимогах технічного завдання, використовуються ще кілька додаткових ітерацій, «випробувань дослідних зразків – внесення корекції до робочої конструкторсько-технічної документації», аж до затвердження конструкторсько-технічної документації, визнаної придатною для використання в серійному виробництві. ДСТУ В-П 15.001:2018 «Система розроблення та постачання на

виробництво озброєння та військової техніки. Основні положення» [61]; ДСТУ В-П 15.004:2019 [41].

- **Стадія построзробки нової системи**

Наступною та заключною є стадія *построзробки*. Вона не належить до розроблення у його класичному розумінні. Тим не менш, відомо, що навіть у процесі освоєння у виробництві системи, можливо і, як правило, виникає необхідність внесення в конструкторську документацію змін, корекцій та кількість їх буває значною. У процесі експлуатації, а *складні інженерні системи* експлуатуються десятки років, часом і понад півстоліття, виникають завдання модернізації, ремонтів. Це все – зона відповідальності *системних інженерів*. Аж до списання та утилізації – такі останні за часом рекомендації міжнародних стандартів із системної інженерії (рис. 2.20).

Крім цього, багато факторів, які визначають якість виробництва та експлуатації, технологічність виробництва, ремонтпридатність конструкцій системи – закладаються ще на ранніх стадіях її створення і особливо на стадіях *розробки*. Організація спеціальних методів роботи, коли на стадії *розробки* системи у її створенні вже беруть участь інженери виробничих спеціальностей: технологи, матеріалознавці, розробники технологічних систем, прийнято називати *паралельною інженерією*. В ефективній організації такої взаємодії системним інженерам належить провідна роль.

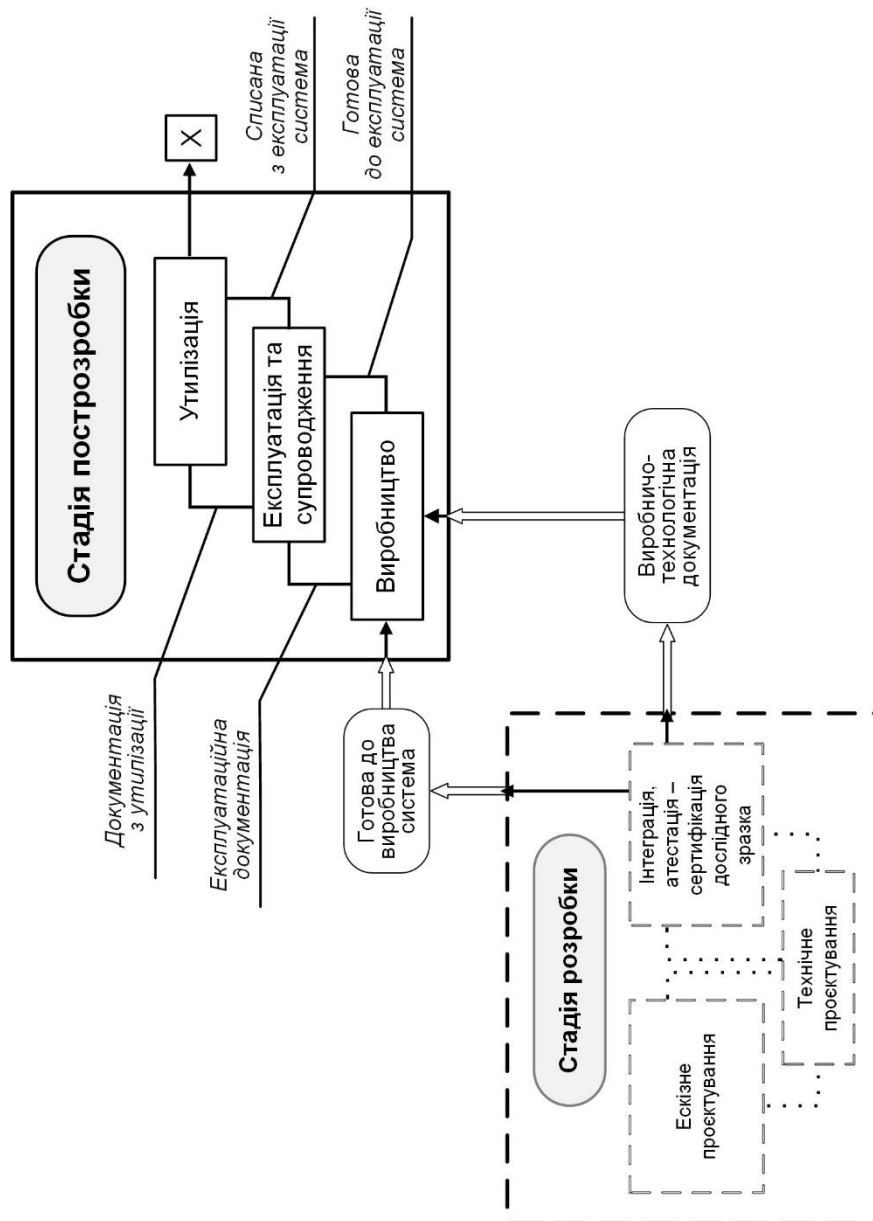


Рис. 2.20. Подання та типовий склад етапів стадії построзробки системи.

Головні цілі, які мають досягатися на цій стадії:

- на етапі підготовки та розгортання виробництва організувати ефективну взаємодію розробників та виробників-інтеграторів системи, сприяючи оперативному вирішенню проблемних питань;
- організувати ефективне технічне сприяння у період *розгортання* та підготовки системи до експлуатації;
- забезпечити дієвий моніторинг та технічну підтримку під час експлуатації, а також здійснювати необхідну модернізацію системи;
- передбачити та розробити основні регламенти та процедури виведення системи із експлуатації, її подальшої ефективної та екологічно безпечної утилізації, забезпечуючи максимально можливе повторне використання дефіцитних ресурсів, окремих компонентів.

На рисунку 2.21 спрощено представлено діаграму «перекриття» у часі основних стадій та етапів створення системи.

Перехід від розробки до виробництва – критичний період у розвитку системи. Змінюється вид та тип основних робіт, змінюються категорії спеціалістів. Розробники поступово витісняються виробничим персоналом. Часто змінюються виробничі структури – система передається від конструкторського бюро на серійний завод. Одночасно, об'єктивно виникає потреба у корекції конфігурації, пов'язана із переходом від дослідного зразка до серійних виробів.

Основними завданнями системних інженерів на виробничому етапі цієї стадії є координація взаємодії численних учасників створення системи, відстеження та усунення ризиків, які завжди

виявляються під час освоєння серійного виробництва, а також контроль дій, які можуть призвести до значних фінансових та тимчасових втрат.

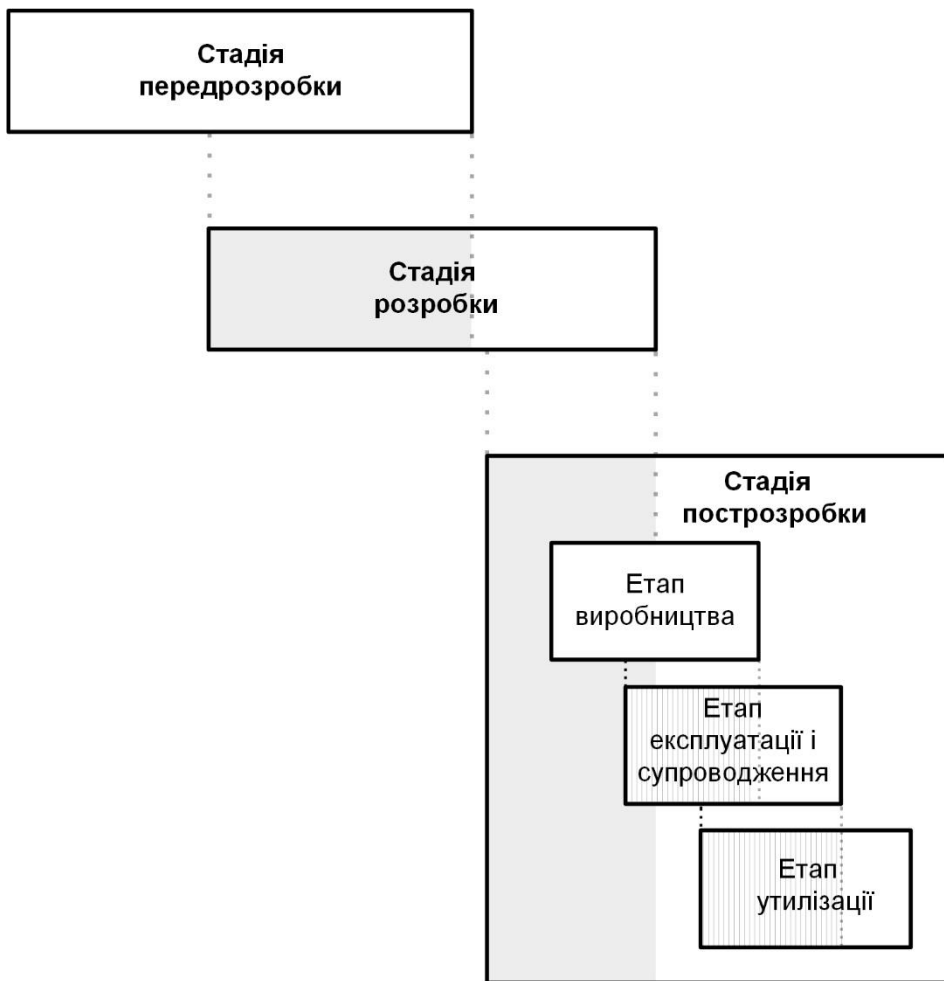


Рис. 2.21. Часове подання основних стадії створення системи.

Етап експлуатації та супроводу теоретично може обходитися поза увагою системного інженера. Це в тому випадку, коли система виконує всі функції, для яких вона призначалася. На практиці на цьому етапі, особливо його ранніх періодах, зазвичай проявляються збої в експлуатації та виявляються

раніше невраховані та не виявлені дефекти і відхилення. Координація робіт із усунення цих недоліків – сфера відповідальності системних інженерів.

Численні питання сполучення та інтерфейсів, як аналізованої системи її підсистемами, так і системами зовнішнього середовища: системами у середовищі функціонування, системами, що забезпечують, вимагають постійної уваги системних інженерів.

Приклад. Відомо, що майже у всіх відомих фірмах, які спеціалізуються на розробленні складних інженерних систем, існують підрозділи, що відстежують якість функціонування розроблених ними систем. Це дозволяє своєчасно координувати усунення дефектів, а також враховувати потребу та необхідність змін у системі під час її модернізації.

Системні інженери зобов'язані координувати роботи на останньому етапі життєдіяльності системи – її утилізації. Для багатьох раніше введених у дію систем етап утилізації не передбачався і не документувався належним чином. Реалізація цих процесів для таких систем потребує розроблення організаційно-технічної, технологічної та економічної документації, а також значних фінансових коштів. Координувати учасників цієї роботи, розробляти відповідні регламенти їх виконання належить системним інженерам.

Для новостворених систем розроблення документації для виведення їх із експлуатації та утилізації також координують системні інженери.

Підбиваючи підсумки укрупненого розгляду складу стадій та етапів життєвого циклу складної системи, у якості корисної ілюстрації про різні стадії створення складної інженерної системи, наведемо дані щодо основних етапів та перипетій створення авіаційно-технічної системи світового рівня літака

Ан-124 «Руслан» (рис. 2.22) [62]. Звертаємо увагу на те, що методологія сьогоденішнього подання системної інженерії тоді ще не була вироблена. Проте, всі основні логічні операції та дії цілком відповідали сьогоденішнім уявленням. Інструментарій, звісно, був інший. Хоча, як підтвердили майже 40 років експлуатації системи, цілком ефективний та адекватний.

Приклад. Видно, що протягом 1964–1966 років виконувались роботи, які за прийнятою сьогодні термінологією належать до першого етапу «Аналіз потреб стадії *передрозробки*». Далі, за період 1966-1969 років реалізується другий етап цієї стадії - Pre-concept або дослідження концепцій. І на період 1971 року – етап концепція – вибір із можливих альтернатив базового варіанту. Аванпроект розглянуто у «Замовника», призначено керівника проекту – системного інженера майбутньої авіаційної системи, якій було присвоєно індекс «Виріб 200».

Таким чином, у розглянутому прикладі тривалістю близько 7 років, було проаналізовано 8 варіантів альтернатив, можливо і більше, та офіційно було дано старт до переходу до наступної стадії життєвого циклу системи «0» у сьогоденішніх термінах військових стандартів.

У період із середини 1972 року по 1978 рік реалізовувалася стадія *розробки* в сучасній термінології, паралельно йшла розробка конструкторсько-технологічної документації, розроблялися програми залучення до розроблення системи, що розглядається, «Виріб 200» інших *забезпечуючих систем*: галузевих науково-дослідних інститутів (ЦАГІ, ВІАМ, ВІЛС, НІАТ), металургійних підприємств, які мали забезпечити виготовлення унікальних, вперше у світі – довгомірних заготовок для крил та фюзеляжу, машинобудівних заводів – що розробляють та виготовляють унікальне металообробне устаткування.

	кінець 1964 р. ІДЕЯ Ан-22	На базі розробленого Ан-22 створити його версію, покращену за тактико-технічними характеристиками
	кінець 1965 р. І варіант	Пророблено декілька альтернативних варіантів літака Ан-122, Міністерству поданий варіант Ан-122 за схемою "Качка"
	кінець 1966 р. ІІ варіант	Запропоновано урядовій комісії військово-промислового комплексу. Проект відхилений комісією ВПК. Запропоновані уточнення: • турбовинтовий двигун; • більша швидкість; • тощо
	початок 1967 г. ІІІ варіант Д-18	Підготовлений для розгляду літак зі стрілоподібним крилом та 4-ма перспективними двигунами Д-18
	кінець 1968 р. ІV варіант Ан-126	Підготовлений та запропонований для розгляду Міністерству авіаційної промисловості (МАП) та Міністерству оборони (МО) Проект Ан-126 з 6-ма двигунами Д-18, Т-подібним оперенням
	кінець 1969 р. V, VI варіанти	Підготовлені та розглянуті Ан-124-I, Ан-124-II з 4-ма двигунами Д-18
	середина 1971 р. VІ, VІІІ варіант Ан-124 Виріб «200»	Підготовлений та затверджений Міністерством Проект виробу «200» з 4-ма двигунами Д-18 та рішення щодо розвитку робіт постачальниками агрегатів, матеріалів тощо. Аванпроект розглянуто у МАП. Доручено розробити ескізи проекту виробу «200» з Т-подібним кілем. Призначено керівника проекту
	середина 1973 р. Перший натурний макет Ан-124 (виріб «200»)	Макет літака Ан-124 у натуральну величину. Представлений «макетній» комісії, сформованій із представників уряду, менеджерів та науковців
	початок 1974 р.	Рішення Міністерства АП «Про розгортання робіт із створення Ан-124. Дослідний зразок подати у 1980 році

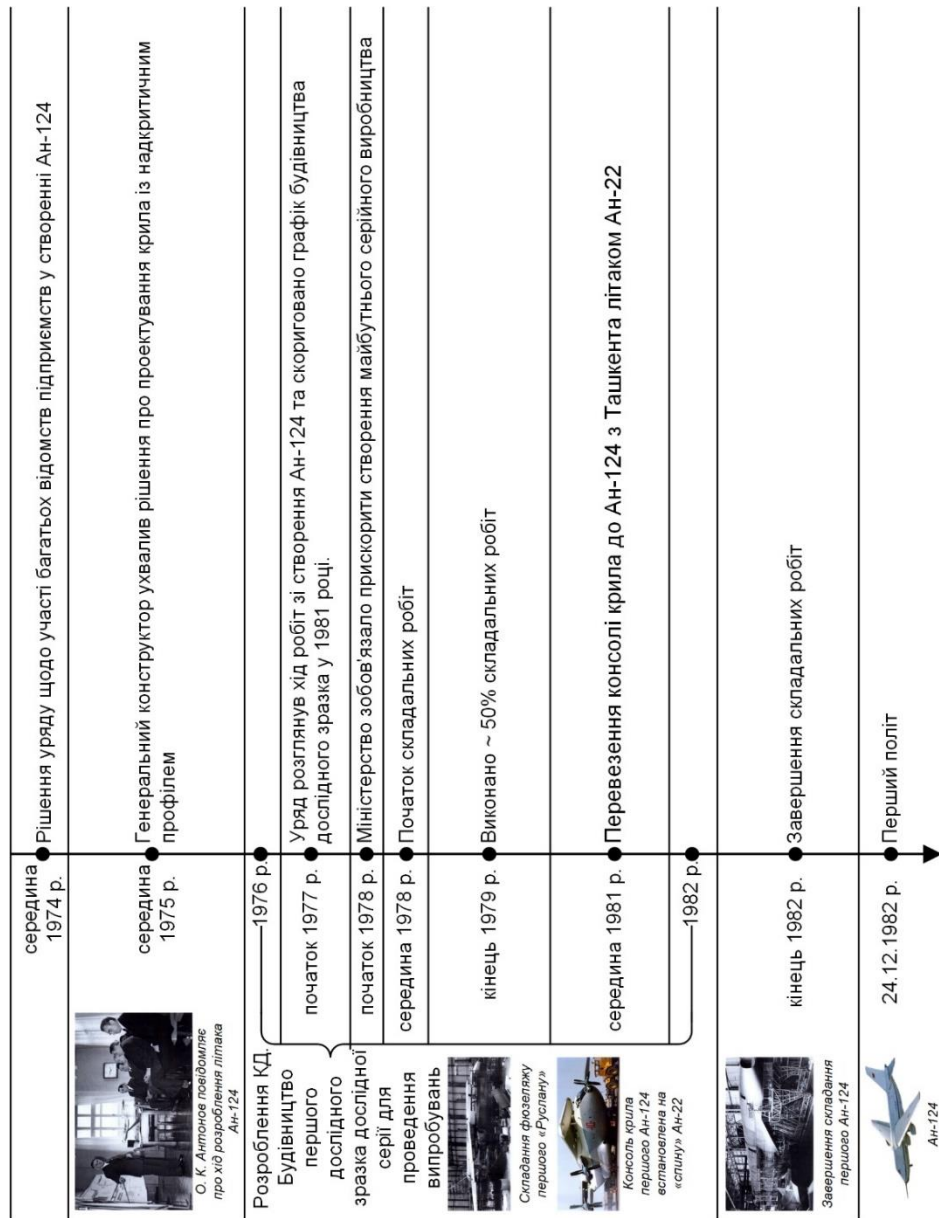


Рис. 2.22. Хронологія ключових подій створення літака Ан-124 «Руслан» [62].

Стадію *построзробки* за прийнятою нами класифікацією окремо не виділено. Роботи в рамках її велися паралельно, починаючи, орієнтовно з 1974-1975 роках. Початок складальних робіт з будівництва дослідного екземпляра було зафіксовано в середині 1978 року та до кінця 1979 року було виконано 50% складальних робіт. Складання крила гіганта було організовано на Ташкентському авіазаводі (ТАВОіЧ). До середини 1982 року – складальні роботи було завершено. 24.12.1982 року – було здійснено перший політ літака Ан-124 «Руслан». Стадія *построзробки* – другий та третій етапи: «експлуатація» «модернізація» успішно виконуються до сьогодні із перспективою подальшого продовження.

2.3 Підсумки

• Структура та розбиття системи

Можна стверджувати, що подання опису *систем* не завжди об'єктивно, а суб'єктивно. Воно залежить від того, яку позицію щодо *системи* займає людина. Цю його позицію прийнято називати *проектною роллю*. Зараз вважається, що *проектні ролі* мають і ті люди, які впливають на систему і ті, на кого вона впливає.

Проектна роль, за хронологією, передуює появі *системи*.

Якщо не визначено *проектну роль* ініціатора, розробника, замовника, то *систему* немає кому визначити та розпочати її створення.

Вважається типовим, що *основні проектні ролі* майбутньої *системи* можуть мати різні точки зору на те, які основні цілі та функції має досягати та забезпечувати *система*. Успішним може бути старт *системи*, якщо основним *проектним ролям* вдалося досягти компромісу в цьому розумінні.

Важливим результатом діяльності *проектних ролей* є визначення меж *системи* у фізичному світі. До одного із ранніх етапів розгляду системи *проектними ролями* належить виділення *ієрархічних рівнів* майбутньої системи.

Наведено та обґрунтовано один із можливих типових рівнів *ієрархії складної інженерної системи*: Система, Підсистема, Компоненти, Субкомпоненти, Деталі. Рівні *ієрархії*, зокрема, дозволяють виявити різні *проектні ролі* фахівців – розробників системи.

Успішне створення *складних інженерних систем* можливе, якщо на всіх її рівнях формально або неформально визначено *проектні ролі*, що відповідають як за забезпечення функціональності, конструктивності елементів даного рівня *ієрархії*, так і забезпечення інтерфейсів їх взаємодії по вертикалі та по горизонталі з іншими елементами, як системи, що розглядається, так і системами забезпечення і надсистемами.

Для опису та прогнозування поведінки системи, із урахуванням можливої множини варіантів її подання, найчастіше використовують три основні види її декомпозиції:

- як функціональних об'єктів;
- як фізично-конструктивних елементів, що забезпечують реалізацію раніше описаних функцій;
- як у просторі розміщуються частини системи.

Системні ієрархічні рівні прийнято визначати за функціональною декомпозицією. Єдиних підходів до опису функціональної декомпозиції немає. Дослідники використовують певний набір інструментів, який загальноприйнятий у їхньому професійному корпоративному

середовищі: типові функціональні схеми, IDEF–діаграми [45], OMG Essence [33] та низка інших.

Певну складність для інженерів, які починають практикувати в *системній інженерії*, є переведення опису із функціональних властивостей до *фізичних сутностей*. Представлений один із можливих підходів, що дозволяють систематизувати множину функцій *інженерних систем* у чотири класи, які далі деталізуються у функції елементів, яким вже неважко поставити у відповідність фізичні компоненти *систем*.

Однією із важливих задач, що попадають у фокус уваги системного інженера, поруч із вибудовуванням взаємозв'язків функціональних і *фізичних сутностей*, є встановлення несуперечності конструкторсько-технологічних рішень *функціональним вимогам*.

• Поняття життєвого циклу системи

На ранньому етапі розвитку (70-ті роки минулого століття) *системне подання* використовувалося головним чином організації, планування, побудови графіків роботи, контролю над виконанням – тобто як методологія управління проектами. Потім, фахівцями стала окремо виділятися *інженерна сутність*, тобто виконання окремих взаємозалежних циклів та стадій протягом від ідеї створення *системи* до її реалізації. Однією із типових версій подання *життєвого циклу системи* є така: **«це покрокова еволюція створюваної системи від задуму, через розробку до виробництва, експлуатації та подальшої ліквідації»**. Вочевидь, всіх етапах еволюції системи превалює дуже істотна роль *системного інженера*.

Модель життєвого циклу інженерної системи не має єдиного загальноприйнятого подання. Занадто різні можуть бути системи та вимоги до їх опису. Тим не менш, у фаховому середовищі існує загальноприйнята точка зору, що *модель* включає ряд періодів існування *системи*, які розділяються якимись якісними для системи етапами її еволюції.

Пізнавально та корисно еволюційно розглянути, як формувалися уявлення про моделі життєвого циклу складної інженерної системи, це дозволить системному інженеру для власних потреб використовувати одну із них, або будь-яку їхню комбінацію.

Уявлення про моделі розвитку життєвого циклу *систем* еволюціонували в такий спосіб. Спочатку це були суворо поділені за періодами роботи, які характеризують створення системи та які часто поєднуються із *проєктною моделлю*. Потім, у наступних моделях межі переходу періодів розмивалися та візуалізувалися стрілками. Пізніше з'явилися так звані моделі: «*горбата діаграма*», модель «*водоспаду*», у яких вже представлялися ітерації і *розмитість меж* різних періодів життя *системи*.

Найбільш образними сьогодні вважаються «*спіральні*» моделі — що демонструють повторюваність процесів, як найважливішого принципу ітераційного розвитку системи та «*V-подібні*» діаграми, що зорово явно розділяють різні за сутністю та якістю етапи *системного інженера*.

Показано перспективність використання *моделі життєвого циклу системи*, наведеної у міжнародному стандарті ISO/ISE/IEEE 15288:2015 [2], у якості узагальненого інформаційно-рекомендаційного матеріалу.

Зі всіх можливих *моделей подання життєвого циклу системи* виділено *модель*, адаптовану до спеціалізації *системного інженера*. Її зручно візуалізувати «V-подібною» діаграмою.

Розглянуто особливості подання трьох стадій життєвого циклу адаптованої моделі. Стадія *передрозробки*, стадія *розробки* інженерно-технічних рішень, причому ці дві перші стадії вимагають найбільшої концентрації зусиль *системних інженерів*, і, нарешті – стадія *построзробки системи*. Всі ці стадії включають три етапи робіт.

На прикладі розгляду історії створення літака Ан-124 «Руслан» (у 1965–1982 роках) показано зрілість, високу кваліфікацію інженерів того періоду, дотримання ними загальної логіки сьогоденішнього розуміння *системних підходів*, *системного мислення* та системної методології створення *складних інженерних систем*.

У наступних главах (3-5) будуть більш детально розглянуті всі стадії та етапи моделі життєвого циклу інженерних систем, адаптованої до спеціалізації системного інженера.

Питання для самоконтролю глави 2

1. Проектна роль, за хронологією, передує появі системи?
2. Чи можуть основні проектні ролі в рамках системного підходу мати різні точки зору на те, які основні цілі та функції має досягати та забезпечувати система?
3. Які три основні види декомпозиції використовуються для опису та прогнозування поведінки системи із урахуванням можливої множини варіантів її подання?
4. Які можуть бути виділені (умовно) чотири класи функціональних елементів системи?

5. Який зміст укладається у термін «життєвий цикл» системи?
6. Якими моделями життєвого циклу може відбуватися подання складних інженерних систем?
7. Яку форму подання моделей життєвого циклу системи та сутностей матеріального стану системи рекомендовано використовувати системному інженеру?
8. У чому сутність методу вироблення проєктних рішень, який пропонується для використання на всіх стадіях життєвого циклу складних інженерних систем, незалежно від їх типів та видів?
9. У чому особливості подання трьох стадій життєвого циклу моделі, адаптованої до спеціалізації системного інженера, що візуалізовано «V-подібною» діаграмою?
10. Як змінюється вартість помилкових проєктних рішень в залежності від стадії життєвого циклу системи, на якій такі рішення ухвалюються?
11. Чому переходи між основними стадіями створення системи вважаються критичними періодами у розвитку системи?

Глава 3: Стадія передрозробки системи

3.1 Потреби у створенні системи

Як зазначалося у 2-й главі, розробленню системи передуює поява, виявлення будь-яких потреб, які можуть бути задоволені за рахунок розроблення нової системи. Мотиваціями до розроблення нової *системи* можуть бути, у загальному випадку, різні види потреби зовнішнього, відносно до створювачів майбутньої *системи*, середовища. Ці потреби, дуже умовно, можуть бути розбиті на дві групи: потреби *явно виражені* і потреби *неявно виражені*, причому частина їх може бути формалізована і документована, а частина на цьому етапі - не може (рис. 3.1). Якщо потреби явно виражені та формалізовані, то завдання документування їх покладається на спеціальні структури відповідного централізованого органу управління, який ініціює Проект та Заявку на створення *нової системи*. Цьому передуює велика аналітична робота з прогнозування потреб, стану аналогічних робіт у потенційних конкурентів, уточнення цілей та завдань майбутньої *системи*, наявності відповідних технологічних, матеріалознавчих рішень.

У попередньому розділі (табл. 2.5–2.7, поз. 1) наведено приклади документування потреби у різних нормативних документах, що передують виставленню заявки на створення нових систем у військовій та цивільній техніці.

Характерним прикладом потреби, що відноситься до категорії *явно вираженої* та формалізованої, є науково-технічна програма «HORIZON-2020», яка фінансується ЄС та передбачає загальний обсяг фінансування близько 80 млрд євро за період 2014–2020 років [63].

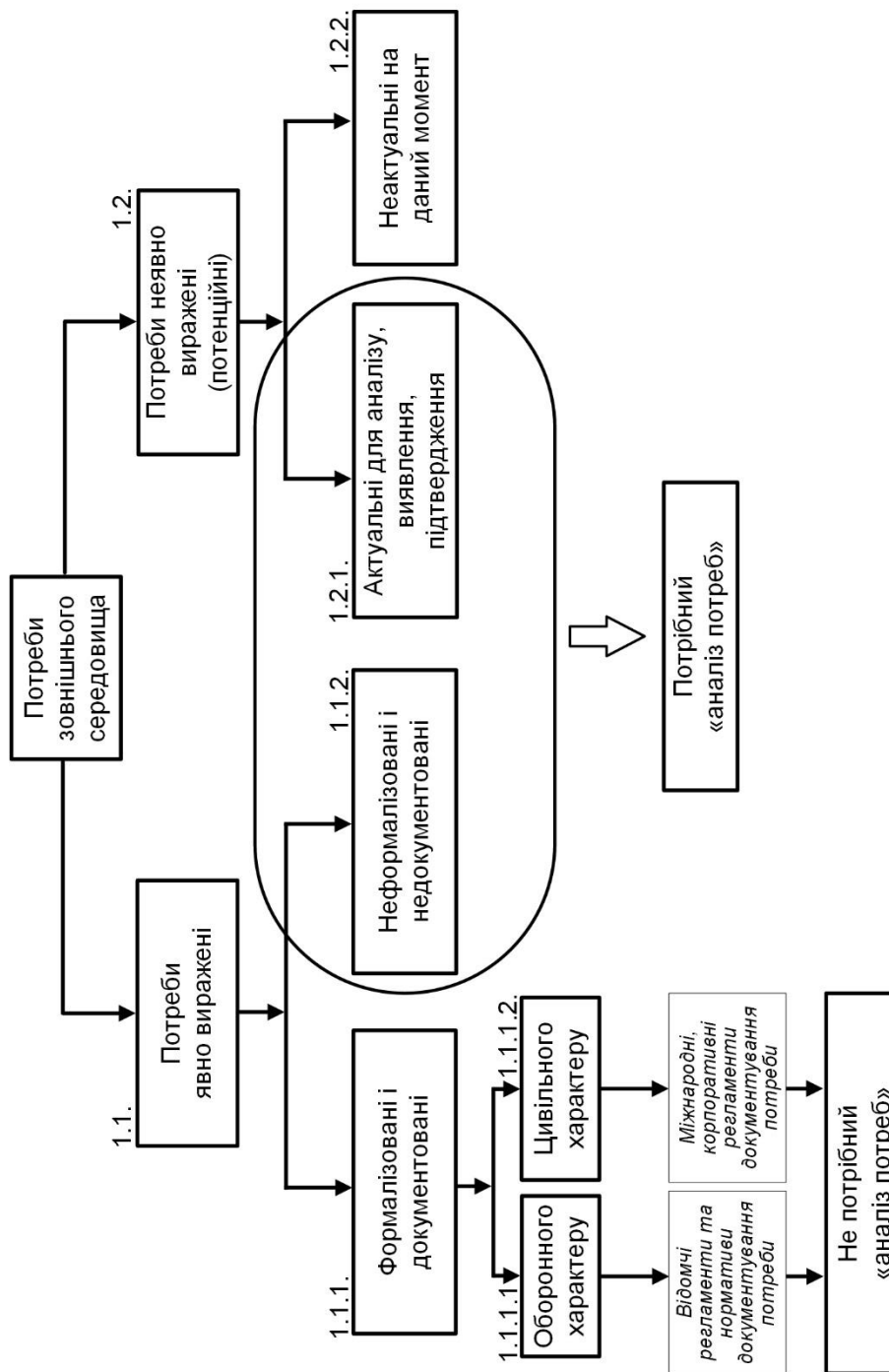


Рис. 3.1. Класифікація потреб зовнішнього середовища з позиції системної інженерії.

Тематика програми розбита на три напрями: передова наука, лідируючі позиції у промисловості та вирішення соціальних проблем (рис. 3.2).

Від потенційних учасників подібної програми вимагається виконання багатьох регламентованих процедур, що стосуються, в основному, підтвердження власних компетенцій як майбутніх розробників «проектів систем» (рис. 3.3–3.4).

Якщо *явно виражена потреба* у створенні *нової системи* виникає у будь-якої комерційної структури, тоді у міжнародній практиці прийнято формувати спеціальний запит RFI - Request for Information, у якому досить докладно описаний комплект вимог щодо створення майбутньої системи та вимоги щодо потенційних виконавців-розробників системи, у цьому числа, наприклад, у формі RFP - Request for Proposal (рис. 3.5).

Вочевидь, що у розглянутих випадках виконання аналітичної роботи із виявлення потреби у *системі*, її базових характеристиках, близьких аналогах, реалізованим цілям, перебуває у сфері *зовнішньої системи*, відносно майбутніх творців *розроблюваної системи*.

У тих випадках, коли потреба в системі явно виражена, але неформалізована, недокументована (рис. 3.1 – «1.1.2.»), чи не явно виражена, але є потенційно актуальною із погляду майбутнього потенційного розробника систем – *системного інженера* (рис. 3.1 – «1.2.1.»), тоді потрібне проведення спеціального комплексу робіт, насамперед щодо аналізу потреб, який стає першим етапом стадії передрозробки *системи* (рис. 3.6).



Рис. 3.2. Структура програми «HORIZON-2020» і процедура запитів та розгляду пропозицій учасників [63].

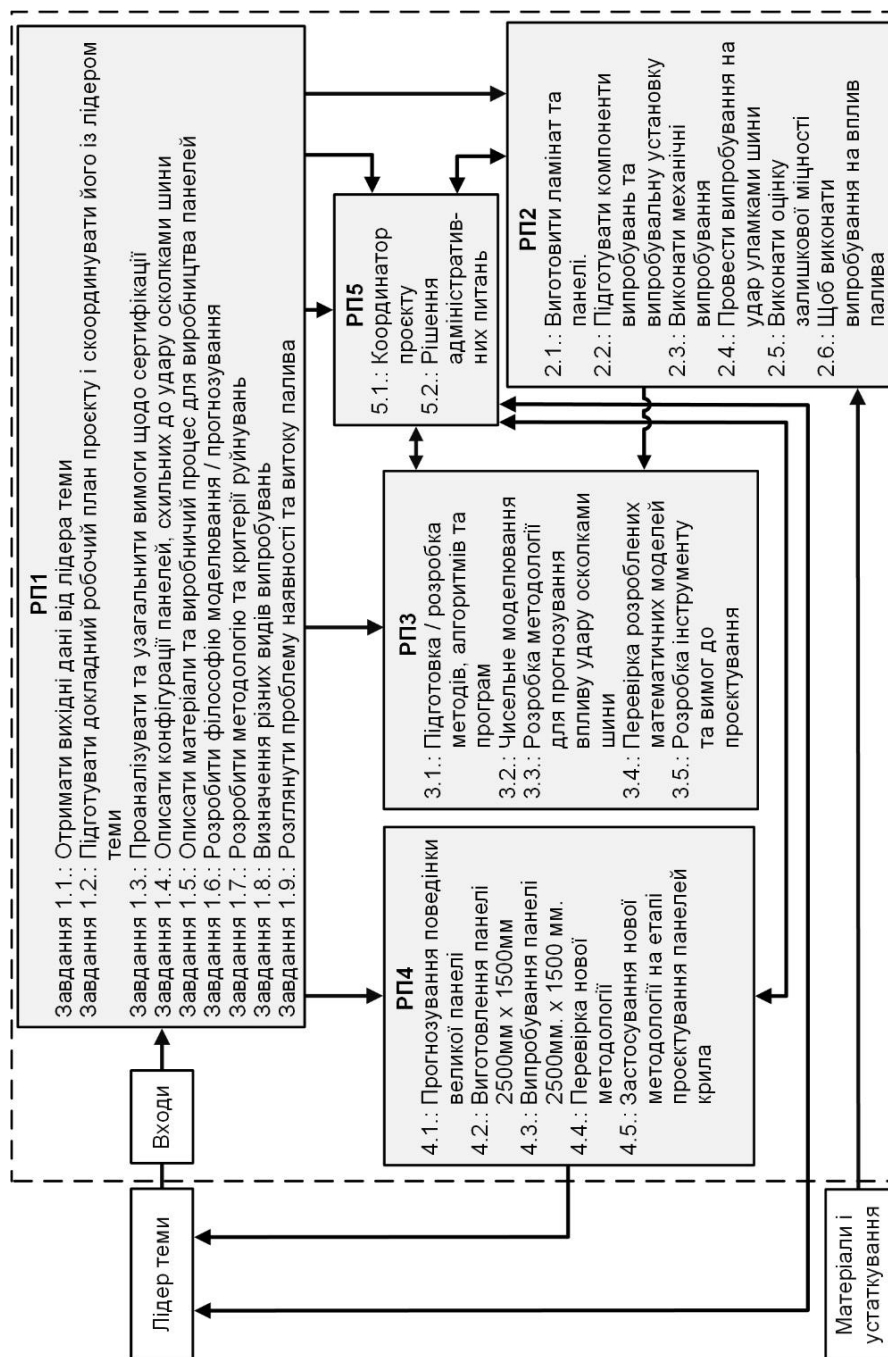


Рис 3.3. Приклад взаємодії **Замовника** та потенційних **Виконавців** проєктів Програми «HORIZON-2020» [63].

РП/Завдання	РП/Керівник завдання	Місяці
РП1. Визначити методологію та докладний робочий план проекту.		
1.1.: Отримати вихідні дані від лідера теми	1/1	
1.2.: Підготувати докладний робочий план щодо проекту та скоординувати його з лідером теми	1/1	
1.3.: Проаналізувати та узагальнити вимоги щодо сертифікації	1/1	
1.4.: Описати конфігурації панелей, схильних до удару осколками шини	1/2, 4	
1.5.: Описати матеріали та виробничий процес для виробництва панелей	1/1	
1.6.: Розробити філософію моделювання / прогнозування	1/4	
1.7.: Розробити методологію та критерії руйнувань	1/4	
1.8.: Визначення різних видів випробувань	1/2, 4	
1.9.: Розглянути проблему наявності та витіку палива	1/2, 3, 4	
РП2. Виготовити зразки для випробувань та виконати програму випробувань.		
2.1.: Виготовити ламінат та панелі	2/2	
2.2.: Підготувати компоненти випробувань та випробувальну установку	2/2, 3, 4	
2.3.: Виконати механічні випробування	2/3, 4	
2.4.: Провести випробування на удар уламками шини	2/3, 4	
2.5.: Виконати оцінку залишкової міцності	2/2	
2.6.: Виконати випробування на вплив палива	2/2, 3, 4	
РП3. Розробити нову методологію прогнозування впливу удару осколками шини		
3.1.: Підготовка / розробка методів, алгоритмів та програм	3/4, 5	
3.2.: Чисельне моделювання	3/4, 5	
3.3.: Розробка методології для прогнозування впливу удару осколками шини	3/4, 5	
3.4.: Перевірка розроблених математичних моделей	3/4, 5	
3.5.: Розробка інструменту та вимог до проектування	3/4, 5	
РП4. Перевірити нову методологію прогнозування поведінки панелі.		
4.1.: Прогнозування поведінки великої панелі	4/4, 5	
4.2.: Виготовлення панелі 2500мм x 1500мм	4/2	
4.3.: Випробування панелі 2500 мм x 1500 мм	4/2, 3, 4	
4.4.: Перевірка нової методології	4/4, 5	
4.5.: Застосування нової методології на етапі проектування панелей крила	4/2, 4, 5	
РП5. Управління проектом		
5.1.: Координатор проекту	5/1	
5.2.: Вирішення адміністративних питань	5/1	

Рис 3.4. Приклад «План-графіка» робіт з Проекту Програми «HORIZON-2020» [63].

RFI - Запит інформації		RFP - Запит пропозиції	
1. Background - Резюме проекту - Назва проекту - Задум проекту та облік очікуваних результатів Проекту - Заява про цілі Проекту - Головні завдання Проекту - Зацікавлені сторони Проекту		1. Background - Резюме проекту - Найменування та очікувані результати Проекту - Зацікавлені сторони Проекту - Постановка задачі та мети Послуги - Головні вимоги до Послуги - Критерії якості Послуги - Критерії вибору виконавця Послуги	
2. Timeline - Графік Послуги - Бажані терміни реалізації - План-графік робіт щодо Послуги		2. Score of Work - Зміст Послуги - Очікуваний зміст Послуги: аналіз потенціалу ринку та оцінка перспектив результатів Проекту; розробка та реалізація змісту Проекту; модель фінансування; модель організації управління - Методика надання послуг - Постановка задачі та мети Послуги - Обґрунтування альтернативного підходу	
3. Response Guidelines - Рекомендації до відповіді - Формулювання змісту Послуги - Бажана тематика відповідей у RFI - Ключові питання, на які бажано надати можливі відповіді - Заохочення розширення інформації у відповідях стосовно Послуги		3. Timeline - Графік Послуги Директивні терміни і план-графік робіт Послуги	
4. Document Requirements - Побаження до інформації відповіді - Узагальнені відповіді на ключові запитання - Практичний досвід успішної діяльності у предметній галузі - Кадровий потенціал для робіт щодо Послуги - Бажана тривалість робіт щодо Послуги - Орієнтовна вартість роботи - Додаткова інформація		4. Document Requirements – Вимоги до документу - Мінімальні вимоги до змісту пропозиції до кожного розділу Послуги - Вимоги до оформлення пропозиції	
5. Evolution Criteria - Критерії Оцінки - Критерії оцінки інформації у відповідь на RFP - Критерії відбору тих, хто отримає RFP		5. Ownership & Knowledge Transfer - Права, передача знань - Права і область використання RFP - Конфіденційність, поширення	
6. Confidentiality – Конфіденційність - Права і область використання RFI - Поширення, копіювання тощо		6. Evolution Criteria – Критерії Оцінки	
		7. Other Terms and Conditions – Інші умови	

Рис. 3.5. Типовий склад RFI, RFP для авіабудівного проекту [64].

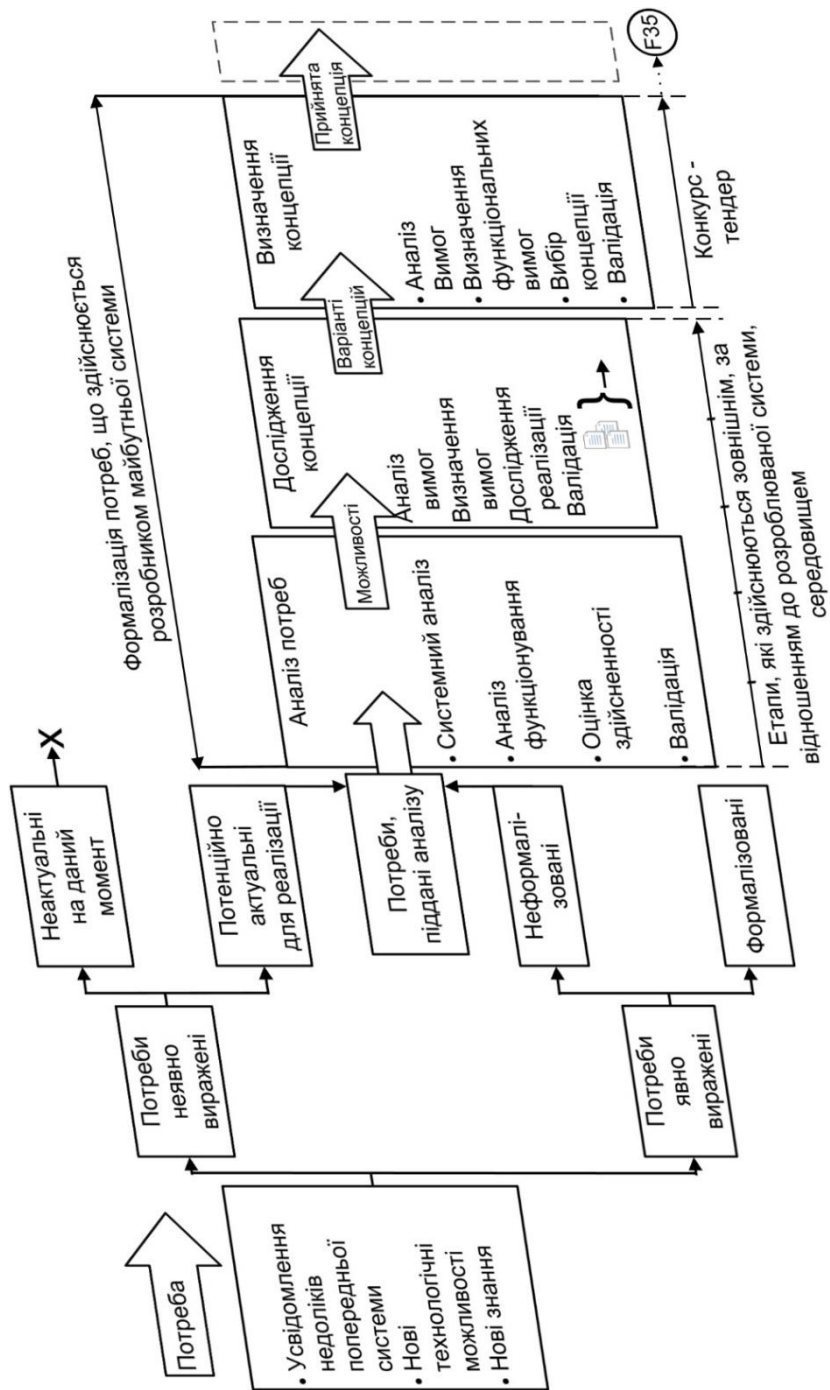


Рис. 3.6. Формальне подання ранніх стадій створення складної інженерної системи.

3.2 Етап аналізу потреб у системі

Коли *потреба* зовнішнього середовища не декомпозиється в явному, формалізованому вигляді у завдання, цілі, функції майбутньої системи, тоді цю задачу – *проведення аналізу потреби у майбутньої системі* беруть на себе *системні інженери і менеджери проєкту* (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Стадія передрозробки: етап аналізу потреби.

Основна мета етапу *аналізу потреб* – перевести знову усвідомлену, прогнозовану, відчувану або передбачувану інтуїтивно *потребу* у формальну та документовану форму. Це подання має дозволити потенційним спонсорам – замовникам і споживачам *уявити* задоволення знову усвідомленої *потреби* із допомогою *створюваної системи*, переконати у виправданості фінансових і часових витрат, необхідних для її створення, і прийнятності ризиків. Після цього має сенс далі розвивати власні переконання, переходячи до наступних етапів стадії передрозробки системи.

У версії [6] етапу аналізу потреби складається з 4-х видів дій:

- Системний аналіз (аналіз вимог до майбутньої системи). Результат – перелік основних високорівневих цілей та можливостей системи (вимог призначення).
- Аналіз та розроблення функціональних вимог (функціональні описи). Результат – перелік вихідних функціональних вимог до системи.
- Оцінка здійсненності (описи фізичної реалізації). Результат – перелік вихідних вимог до реалізації системи.
- Валідації потреб (валідації проєктних рішень). Результат – перелік критеріїв валідації.

Специфікою *складних інженерних систем* є їхня висока або надзвичайно висока вартість створення, велика тривалість розроблення та освоєння у виробництві. У наведеному раніше прикладі із літаком Ан-124 «Руслан» тривалість його створення - від ідеї до польоту «демонстратора» склала 18 років, після цього ще 3-5 років пішло на освоєння серійного виробництва.

Вартість створення багатьох сучасних авіаційних систем сьогодні перевищує мільярди доларів. Тому, очевидно, що

пропозиції, обґрунтування до створення нової *складної інженерної системи* або її модернізації, розвитку повинні бути ретельно обґрунтовані, аргументовані, щоб витримати критику експертів, опонентів, конкурентів.

Розробник нової системи краще, ніж будь-хто інший, може уявити окремі найбільш вражаючі переваги *нової системи*, обґрунтувати їхню цінність і перспективність використання.

Приклад. Розробники важкого транспортного літака Lockheed C-5 Galaxy у 70-х роках минулого століття передбачили в ньому систему дозаправки у повітрі, що обіцяло значне збільшення його корисної вантажопідйомності на десятки тон та збільшення практичної дальності польоту до 12 тис. км.

• Системний аналіз

У найзагальнішому вигляді цьому етапі життєвого циклу структура системного аналізу виглядає так. Оцінка, якомога більш скрупульозна, стану ринку, що відчуває потенційну потребу у *знову розроблюваній системі*. При цьому враховується **сьогоднішні, завтрашні та більш далі** перспективи розвитку ринків. Часто подібну роботу замовляють спеціалізованим консалтинговим фірмам, які залучаються для подібного аналізу на тендерній основі. Робиться це для того, аби результати викликали більшу довіру у потенційних спонсорів майбутньої системи.

Оцінка розвитку прикладних НДДКР у сфері створення *нової системи* дозволяє прогнозувати розвиток показників та функцій системи.

Типовим інструментом **аналізу** є побудова **дерева високорівневих цілей**, для досягнення яких система має орієнтуватися. Виконується **декомпозиція цих цілей**, на

даному етапі не глибше 2-х - 3-х рівнів. Дослідження **дерева цілей** стимулює розробників майбутньої системи фокусувати увагу на першочергових цілях, не відволікаючись на менш важливі. Важливим завданням побудови **дерева цілей системи** є наступна ідентифікація функцій та вимог до відповідних показників **функціонування**.

У самому загальному випадку, в результаті системного аналізу, як мінімум, має бути сформовано склад **основних цілей**, для реалізації яких створюється *система*, а також **перелік можливостей**, що досягаються *системою*.

- **Аналіз та розроблення функціональних вимог**

На цьому ранньому етапі процесу *передрозробки системи* розглядається питання, чи є здійсненням досягнення поставленої цілі та підцілей за рахунок забезпечення їх існуючими на даний момент і в найближчій перспективі функціональними можливостями. Для цього рекомендується перетворити раніше виявлені цілі та підцілі в описи функцій, що забезпечують їхнє досягнення. Далі – виконати функціональну декомпозицію за допомогою опису функціональних взаємодій та формування її модульної конфігурації (рис. 3.8). Одна річ стверджувати, загалом, що «можна створити літак, здатний перевозити вантаж габаритом, наприклад, 6 x 12 м та сумарною масою 100 т» та інша – уявити це навіть у високорівневій *функціональній моделі* і підтвердити це за її окремими *компонентами*.

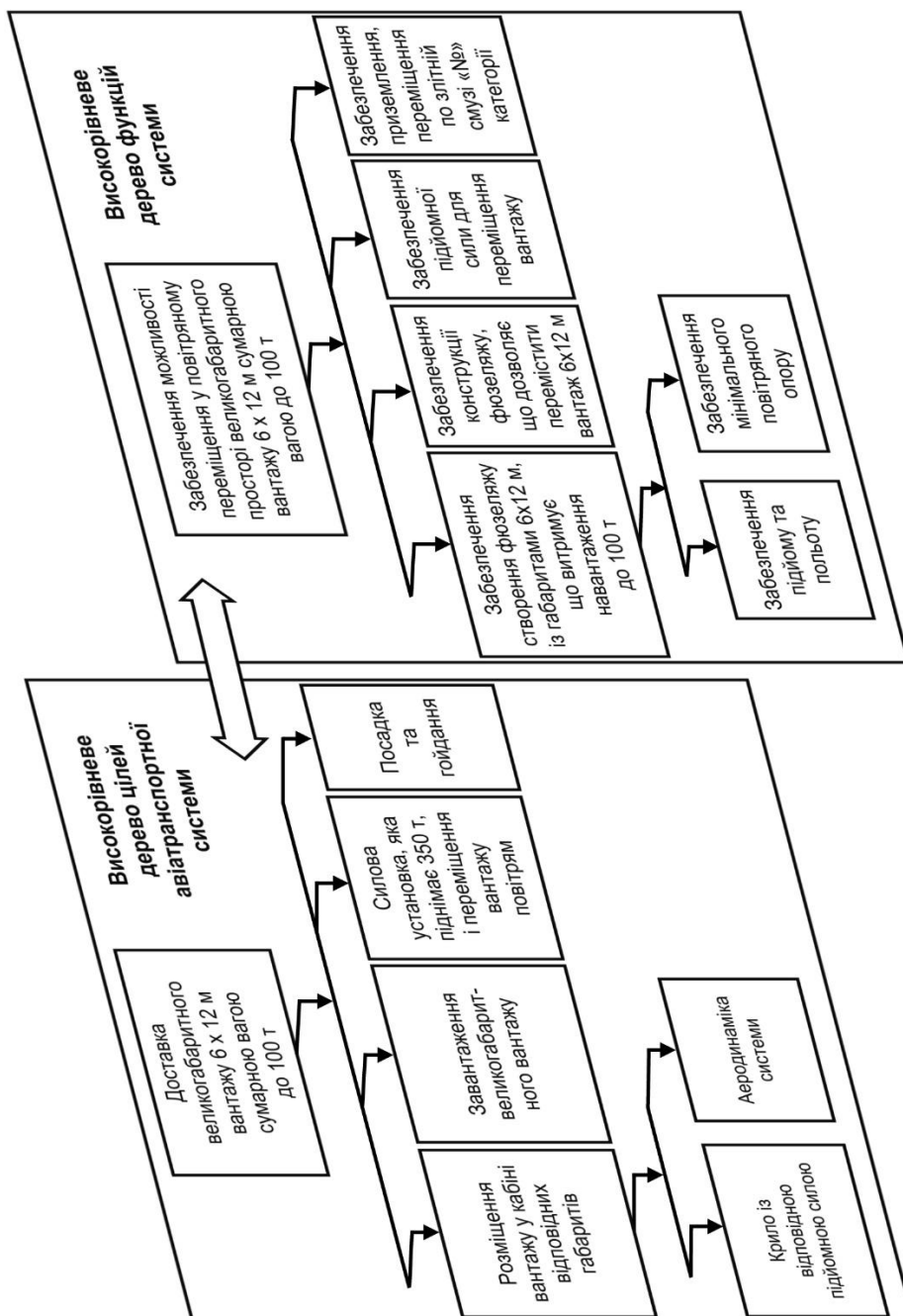


Рис. 3.8. Високорівнева модель перетворення цілей у функції системи.

Важливим є наочне подання того, як функції розподіляються, поєднуються і реалізуються у новій системі. Тут не такі важливі деталі. Потрібно візуалізувати *найвищий рівень системи* та продемонструвати, що необхідні можливості можуть бути забезпечені відповідними **функціями**, які прийнятним способом будуть реалізовані технічно в реальних умовах.

Результатом є, як мінімум, **перелік верхньорівневих**, тобто найважливіших та узагальнених **вихідних функціональних вимог**.

• Оцінка здійсненності

Функціональне представлення системи дає можливість **потенційним замовникам та споживачам** відчувати принципову можливість її реалізації. Далі *системні розробники* повинні вести клієнтів «дорогою, що розкриває» нові сутності процесу створення *майбутньої системи*. На цьому етапі від функцій потрібно перейти до фізичної реалізації. Звертаючись до попереднього прикладу, слід давати оцінку та економічні обґрунтування у реальній можливості матеріалізації цих функцій. Наприклад, підтвердити де, коли і як створювалися фюзеляжі подібного габариту, крила тощо, чи є відповідна виробнича база, інфраструктура, до речі, із області *систем, що забезпечують*: яка потрібна довжина злітно-посадкової смуги, скільки і де таких є, яка відстань між ними, чи вистачить літаку запасу пального для підльоту до них? І ще, природно, багато подібних питань мають бути якнайбільш переконливіше освітлені. Підсумовувати цей підрозділ мають дані укрупненого техніко-економічного обґрунтування витрат на *створення системи* та оцінка повернення їх **майбутнім замовникам**.

• Валідація потреб

Нагадаємо, що в рамках міжнародного стандарту ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2] термін: **валідація**, атестація (validation) означає наступне: підтвердження (на основі подання об'єктивних підтверджень) того, що вимоги, призначені для конкретного використання або застосування – виконані. У контексті життєвого циклу **валідація** є сукупністю дій, що гарантують і забезпечують упевненість у тому, що система здатна реалізувати своє призначення, поточні та перспективні цілі.

Стосовно цієї ранньої стадії передрозробки – аналізу потреб, **поняття валідації передбачає ухвалення рішення про значущість представлених аргументів, що свідчать на користь наявності потреби у новій системі**, а також наявності можливостей задовольнити виявлену потребу із адекватними витратами та розумними ризиками. На практиці цим завданням відповідають процеси, реалізовані у межах аналізу експлуатаційної ефективності. Найчастіше для цього розробляється відповідна аналітична (математична) чи імітаційна модель умов експлуатації запропонованої системи. Умови експлуатації у ній моделюються набором сценаріїв. На початку, більш ймовірні, потім менш ймовірні тощо. Критеріями оцінки є «відклики» *системи*, як показники **функціонування**.

Важливим результатом дій щодо валідації системи є формування переліку **критеріїв валідації**.

При цьому підході слід розглянути «ключи» до оцінки **функціонування системи**. Існує багато способів подання показників, що характеризують ефективність та функціональні

можливості системи. У США найчастіше використовують такі [6]:

- **показник ефективності** – MOE (Measures of effectiveness) - якісний чи кількісний показник, що характеризує поведінку системи загалом;
- **показник функціонування** – MOR (Measures of performance) – кількісний показник, який служить для опису характеристик системи або її окремих властивостей чи підсистем.

Найчастіше MOR є мірою фізичної величини. Загальновизнана пріоритетність показника MOE над MOR. Зазвичай MOE та MOR включають: показник, одиницю вимірювання, умови або контекст застосування цього показника.

Приклад. У якості MOE одного із типів літака «Х» вибрали максимальну дальність, виражену в кілометрах, з повним завантаженням 6 тон, таким чином, показником MOE є: «максимальна дальність», одиницею вимірювання – км, умови – з повним завантаженням.

Зазвичай із усіх можливих форм подання показників виділяють три категорії: вимірювані, імовірнісні та логічні.

Вимірювані, як випливає із визначення, піддаються прямому виміру; імовірнісні відповідають ймовірності прояву деякої події; логічні використовуються для визначення чи виходить якась характеристика за межі порогових значень. Пояснимо, якщо у наведеному вище прикладі прийняти максимальну дальність 5 тис. км, ввести в розгляд логічне MOE – 5,5 тис. км, тоді в цьому прикладі логічне MOE відповідає відповіді «Так» – перевищує.

Методики, засновані на використанні цих та подібних до них показників досить ефективні і застосовуються в системній інженерії повсюдно.

Виконавши всі чотири види дій, наведених нижче, з'являється можливість отримані результати сформувати в набір

формалізованих, кількісно представлених даних, який прийнято об'єднувати загальним поняттям – **вимоги призначень**, які складаються з 4-х складових *вимог*:

1. **Вимоги призначення** (operational requirements) або вимоги до можливостей системи чи необхідні можливості системи. Цей вид вимог формулюється досить широко, він повинен розкривати головне призначення та основні цілі створення системи, тобто відповідати на запитання «Навіщо?».
2. **Функціональні вимоги** (functional requirements). Зазвичай їх потрібно виражати у кількісному вигляді, на цьому етапі система сприймається як ціле, без декомпозивання. Ці вимоги мають відповідати на запитання, *«що система повинна робити?»*. Мають бути описані завдання, які має вирішувати система під час експлуатації.
3. **Вимоги до показників функціонування** (performance requirements). Виражаються майже завжди об'єктивними показниками чи кількісно. Показують *«наскільки добре»* система має виконувати основні завдання.
4. **Вимоги до реалізації** (physical requirements). У загальному випадку відносяться до фізичних обмежень конструкції системи – її масогабаритних, потужнісних та інших обмежень. Відповідають на запитання: *«Яка має бути її конструкція?»*.

Склад цих вимог та глибина їх опрацювання залежить від ступеня новизни розроблюваної системи. Якщо система розробляється без попередніх аналогів, цей набір вимог на цьому етапі може мати найзагальніший і неконкретний характер. При цьому мається на увазі, що вони будуть ітераційно уточнюватись на двох наступних етапах цієї стадії.

Необхідно відзначити, що сучасне міжнародне поняття «вимог» асоціюється із міждисциплінарною діяльністю, яка є інтерфейсом між замовником і постачальником системи [65]. Воно досить суворо регламентоване та описане. Все більше приходить розуміння того, що до побудови та змісту вимог повинні висуватися спеціальні *вимоги*: необхідність, незалежність від реалізації, недвозначність і цілий ряд інших [66].

3.3 Етап дослідження концепції системи

У попередньому розділі розглянуто етап *аналізу потреби*, основними завданнями якого було зафіксувати *набір вимог призначення*, які описують загальне подання системи та які **основні цілі** вона має досягати, а також **підготувати** та **задокументувати** обґрунтування, що дає право на початок **розробки системи**.

Якщо цей етап досяг своєї мети, і спонсорів вдалося переконати у розумності та обґрунтованості сформульованих *вимог призначення*, а також можливості їх досягнення в рамках наявних фінансових та інших обмежень, то можна переходити до наступного кроку – *дослідженню концепції* (рис. 3.9).

Слід зазначити, що такого явного позитивного рішення від спонсорів вдається досягти не завжди. Частіше, рішення бувають більш розпливчастими, типу не «так» і не «ні», «але продовжуйте працювати на свій страх і ризик, ми готові розглянути більш переконливі пропозиції». Яскравим прикладом наведеному є раніше представлена хронологія перших 5-ти кроків розгляду концепції *системи літака* Ан-124 «Руслан» (рис. 3.10).

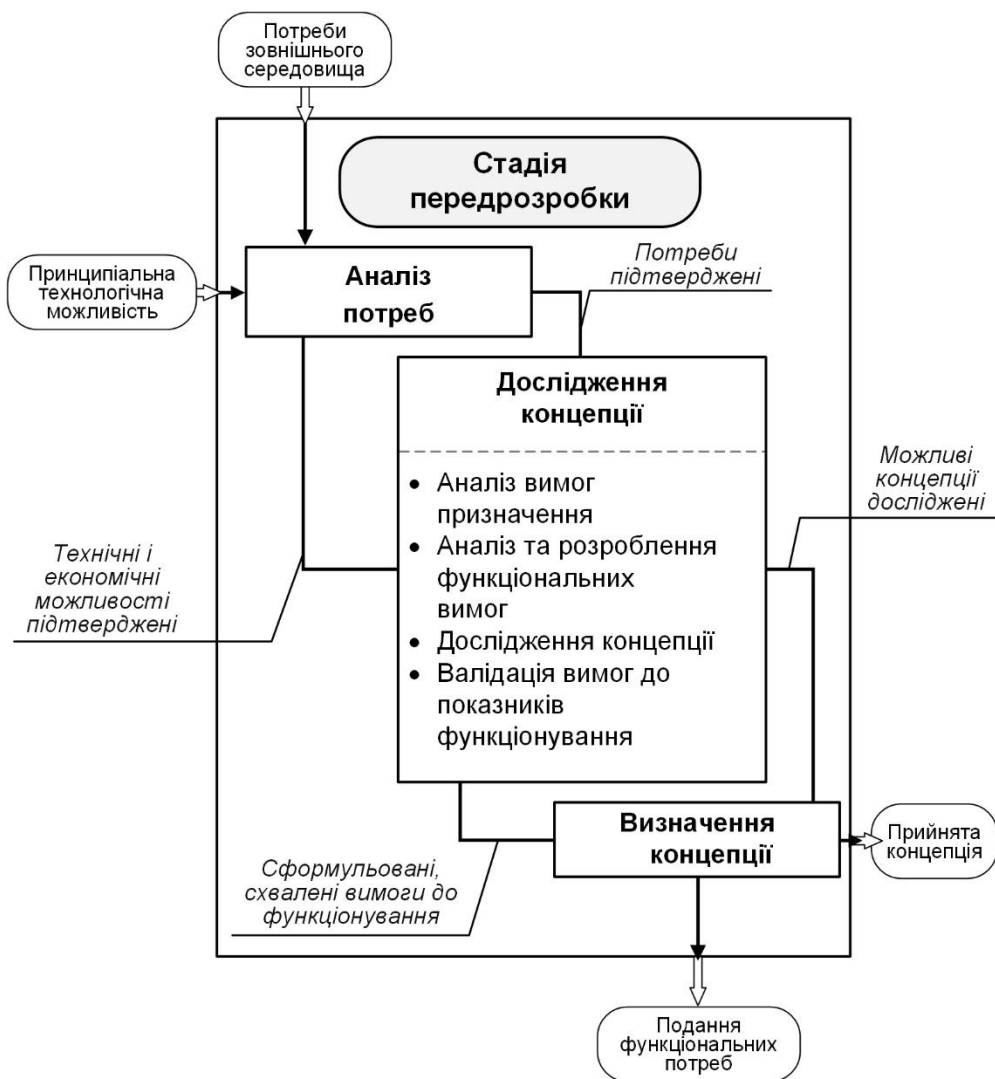


Рис. 3.9. Стадія передрозробки: етап дослідження концепції.

Проте, якщо у ініціатора створення нової системи вистачає рішучості, впевненості та фінансів, що дуже важливо, він вдається до наступних кроків.

У такому разі можуть бути виділені наступні чотири необхідні дії етапу дослідження концепції в системі [6]:

- Аналіз вимог призначення.
- Аналіз та розроблення функціональних вимог;
- Дослідження концепції;
- Валідація вимог до показників функціонування.

Проробивши попередню роботу, отримавши, у тій чи іншій мірі, схвалення чи не суперечність її продовження, ініціатор – системний інженер може розпочати більш скрупульозний аналіз вимог призначення, щоб ідентифікувати, уточнити *вимоги до показників функціонування*, зробити відбір – **синтезувати** і **мінімізувати** їх, а також **валідувати**.

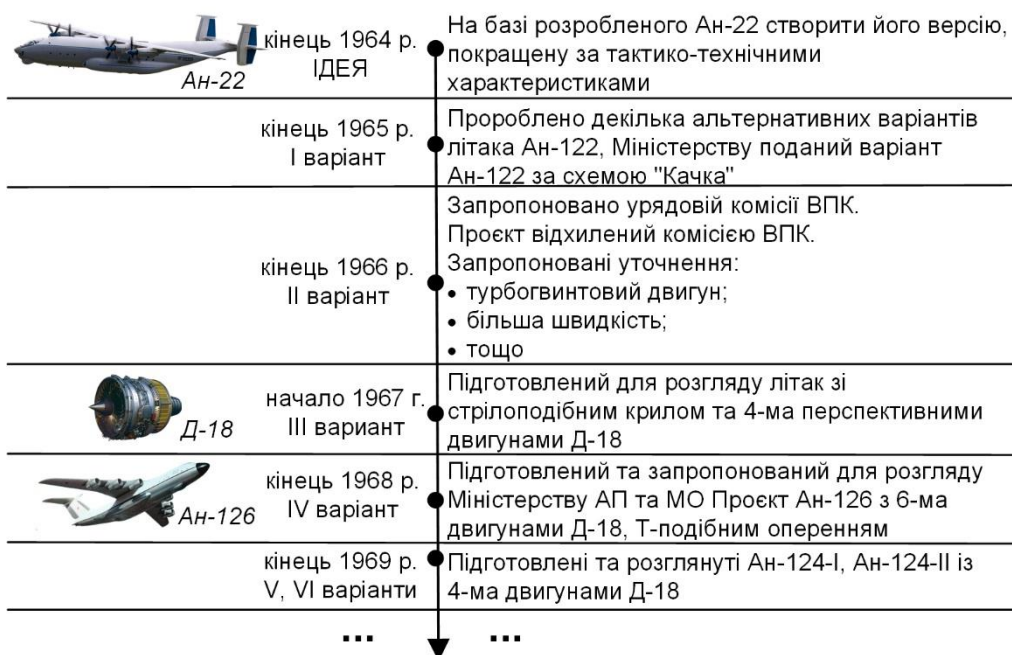


Рис. 3.10. Фрагмент подання перших 5-ти етапів хронології [62].

- **Аналіз вимог призначення**

До етапу дослідження концепції, як зазначалося, **практичні потреби та вимоги призначення**, у першому наближенні виявлені та зафіксовані. Найчастіше вони виражені мовою користувача, споживача, їх тепер належить перетворити **на набір вимог**, що відносяться до *розроблюваної системи*, тобто **показники функціонування**, вимірювані та фіксовані. Необхідно пам'ятати, що саме **вимоги** до системи, якщо замовника вдасться переконати, потім будуть використані у вигляді технічних додатків до **договорів** між замовником і виконавцем.

Для **аналізу вимог призначення** залучаються зазвичай відповідні аналітики, що спеціалізуються на **інженерії вимог** подібних типів систем. Як правило, ці фахівці мають у своєму розпорядженні дані щодо залежностей показників функціонування від застосовуваних технологій, витрат на інфраструктуру, організацію та опис виробництва, персонал, вони мають виконати аналіз ефективності *системи*, зіставивши її з необхідним рівнем функціональних показників.

Працюючи із **вимогами** треба бути готовим до того що, що отриманий набір **вимог**, зазвичай, то, можливо внутрішньо суперечливий, частина **вимог** є надлишковою. Тому в процесі роботи належить усунути найбільш явні протиріччя щодо їх оцінки.

Аналізу піддається сформульований раніше і, можливо, оновлений вихідний склад **вимог**, оцінюються різні атрибути окремих **вимог** та їхнього набору. Використовуються різні, сформовані в аналітичному середовищі **набори критеріїв**, що дозволяють встановити коректність формулювання **вимог**. Під

час розроблення **вимог** типовим є пошук відповіді на такі, начебто, найпростіші питання: *навіщо? хто? що? де? коли? як?* У разі оцінки **вимог призначення** концентрується увага на питанні «*навіщо?*». Відповівши на нього, можна визначити **цілі та задачі**. На прикладі із раніше згадуваною авіаційно-транспортною системою на питання «*навіщо?*» формулюються основні цілі та задача: «Щоб доставити великогабаритний надважкий вантаж оперативно на дуже велику відстань».

Часто виділяють низку **типових критеріїв**, які зручно використовувати під час підготовки **вимог до показників функціонування системи**. У роботі [6], наприклад, наведені наступні сім критеріїв, що допомагають коректно виявити найважливіші **вимоги призначення**, а також **питання перевірки достатності** їх у комплексі:

1. Чи простежується джерело **вимог** у явному вигляді?
2. Чи не є **вимога** надмірною порівняно із іншими?
3. Чи не є суперечливою ця **вимога**, в порівнянні із іншими?
4. Чи не припускає **вимога** подвійного тлумачення?
5. Чи здійсненна **вимога** технічно?
6. Чи є **вимога** економічно обумовленою?
7. Чи можлива верифікація **вимоги**?

Окремо рекомендується проводити перевірку **набору всіх вимог** у комплексі, відповідаючи на такі типові питання:

1. Чи достатній цей **набір вимог** для покриття всіх виявлених чи наявних потреб?
2. Чи може бути реалізований цей **набір вимог** із урахуванням витрат, термінів та технічних можливостей?
3. Чи дозволяє цей **набір вимог** провести верифікацію?

Як правило, **аналіз вимог** виконується в ініціативному порядку **ініціатором** розробки *системи*, за власні кошти, тому очікувати скрупульозного та системного представлення потреб малоймовірно. Але, тим не менш, в міру просування вперед необхідно прагнути, щоб на фініші цього етапу: *дослідження концепції*, **вимоги призначення** були більш коректно сформульовані і узагальнені у несуперечливий документ.

- **Аналіз та розроблення функціональних вимог**

На цьому етапі належить перетворити вимоги, сформульовані раніше, з *позиції користувача*, зазвичай виражені у формі опису *результатів роботи системи* у **вимоги функціонування**, однозначно подані у формі технічних характеристик. Таким чином, здійснюється перехід від описової термінології до показників функціонування, які надаються у суто технічній формі, що значно розширює коло учасників розгляду проблеми за рахунок можливості залучення спеціалістів предметних областей діяльності (рис. 3.11).

Крім цього, на відміну від попереднього етапу, тут бажано конкретизувати показники **функціонування** та, за можливістю, перейти до наступного кроку функціонального опису – опису функцій підсистем, а також візуалізації їх у вигляді фізичних компонентів. Замовник має поступово звикати поелементно візуалізувати майбутню систему.

Приклад: Останнє наочно ілюструється прикладом із етапами розробки Ан-124 «Руслан», коли на перших ранніх кроках (кінець 1965 р.) керівництву міністерства авіаційної промисловості було представлено кілька альтернативних варіантів літака Ан-122, схожих на існуючий попередній прототип літак Ан-124. 22, але із вертикальним оперенням типу «Качка», який був відхилений із зауваженнями, що вимагали усунення.

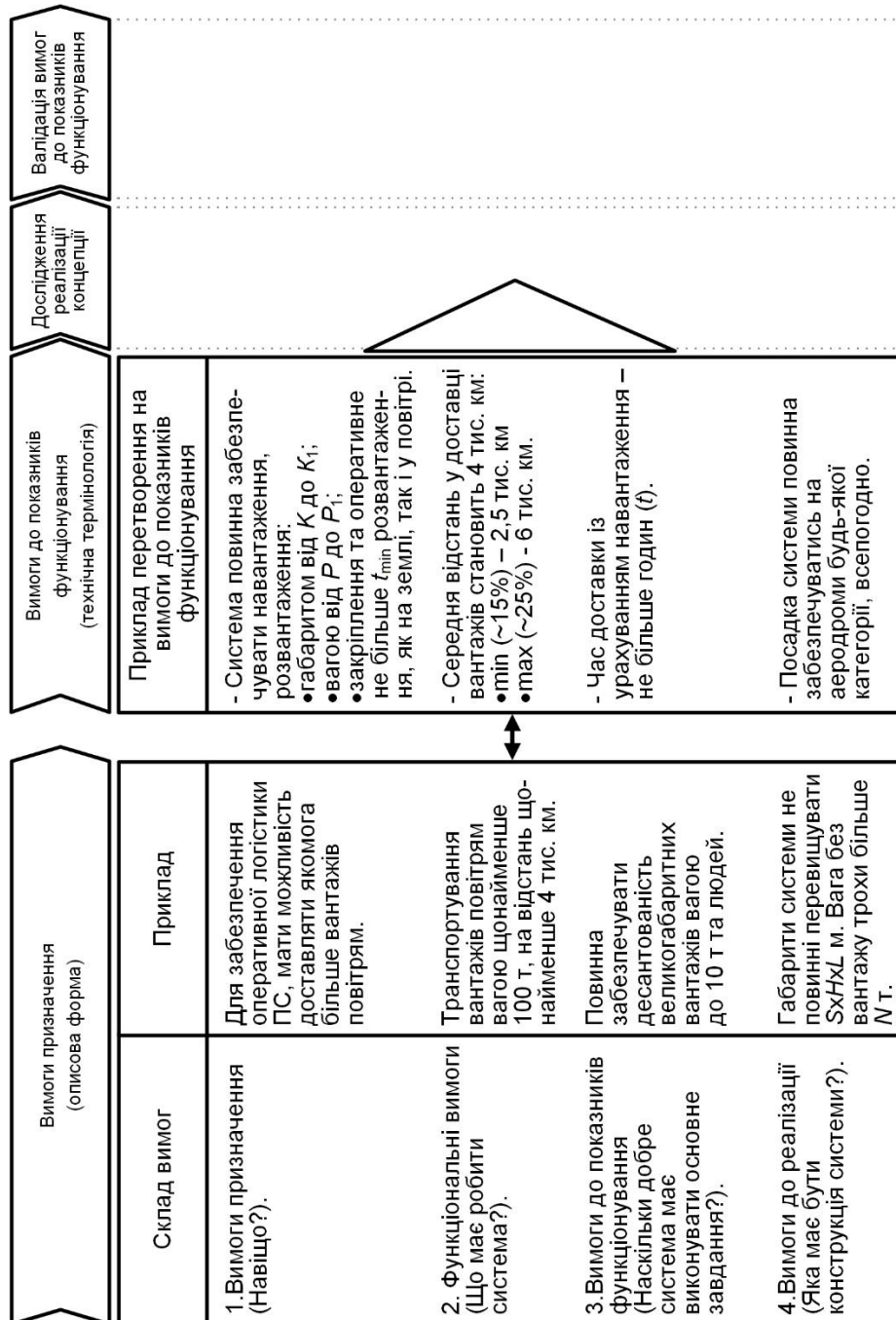


Рис. 3.11. Перетворення вимог до технічної термінології.

Переведення **вимог до показників функціонування** потребує певної навички. Пов'язано це із тим, що з процесу матеріалізації системи характерний *індуктивний* підхід – «від частинного, до загального». Але тут прихована суперечність, очевидно, що на ранніх стадіях створення системи багато її деталей ще не відображені у **вимогах**, тому частіше використовують *дедуктивний* метод – від загального до частинного. Таким чином, можна стверджувати, що процес декомпозиції системи має недетермінований характер – неоднозначний.

Приклад. Потрібно створити БПЛА, який має перебувати в повітрі як можливо більш тривалий час, покладемо більше 24 годин. Це може бути досягнуто багатьма шляхами, як мінімум такими:

- оснастити його надвисокоєфективним двигуном, із мінімальним споживанням пального;
- оснастити його електричним двигуном із системами підзарядки від сонця;
- робити його із надлегких матеріалів, тоді пального вистачатиме надовго;
- можна скомбінувати вище запропоновані шляхи.

Видно, що ту саму мету можна досягти великою кількістю способів. Із цього випливає, що за якогось заданого набору **вимог призначення** (у нашому випадку – перебування у повітрі можливо довше 24 годин) не існує прямого (дедуктивного) методу, який дозволяє однозначно вивести певний набір **показників функціонування**, необхідний і достатній для задоволення виявлених потреб.

Найчастіше під час вибору концепції домінуючими якостями розробника є **досвід, інтуїція, евристика**, на жаль, часто – метод проб і помилок.

Як правило, використовується наступний алгоритм дій. Експертним шляхом визначаються різні конфігурації системи,

потім аналізуючи дані, визначають їх **показники функціонування**, які, у свою чергу, піддаються аналізу ефективності встановлення відповідності заданих та прогнозованих результатів.

Як уже зазначалося вище, декомпозиція та ідентифікація функцій *системи* потребує певної практики та кваліфікації. У роботі [6] наводиться спрощений наочний підхід, який цілком може бути використаний у реальній практиці.

Раніше наводилася умовна класифікація функціональних середовищ (див. Глава 2): **сигнали, дані, матеріали, енергія**. Використовуючи її, рекомендується отримати відповіді на такі запитання:

1. Чи існують цілі в системі, які досягаються із використанням датчиків контролю та комунікації?

Якщо відповідь позитивна, необхідно передбачити функції роботи з сигналами.

2. Чи потрібна інформація для управління роботи системи?

За позитивної відповіді мають бути функції роботи із даними.

3. Чи потрібні для роботи системи механізми, що забезпечують її роботу матеріальними компонентами.

Якщо так, то які вони виконують операції? Якими функціями це буде забезпечено?

4. Чи потрібна системі енергія для її функціонування?

Якщо так, це має бути передбачено відповідними функціями.

Після подібного аналізу функції можуть бути віднесені до однієї з 3-х категорій: ввід, трансформація, вивід (табл. 3.1).

Звісно, у складних системах кількість функцій трансформації може бути великою. Побудувавши вихідний перелік функцій,

слід ідентифікувати «входи» та «виходи», як показано в Розділі 2.

Таблиця 3.1. Спрощене подання функцій та процесів системи.

Функції	Процеси
Ввід	виявлення подачі сигналів подачі даних подачі матеріалів подачі енергії
Трансформація	трансформація «входів» у «виходи».
Вивід	інтерпретації відображення синтезу виводу: • сигналів; • даних; • матеріалів; • енергії

Визначивши «входи» та «виходи» системи можна ідентифікувати функції трансформації (рис. 3.12).

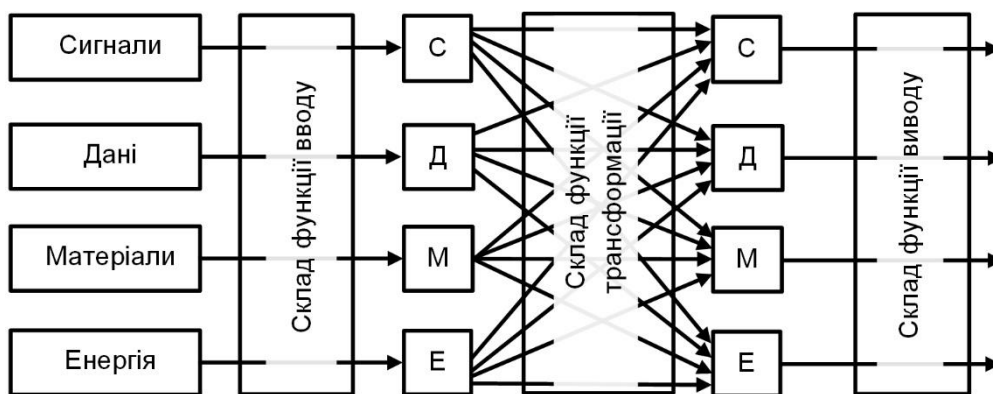


Рис. 3.12. Візуалізація категорій функцій «вводу», «трансформації», «виводу» у функціональних середовищах [6].

Маючи ці подання, зручно використовуючи дедуктивний метод, можна ідентифікувати функції:

- «ввід» виявляється зі списку «входів»;
- «вивід» виявляється зі списку «виходів»;
- «трансформація» виявляється, використовуючи індуктивний підхід. Це полегшується тим, що відома необхідність перетворення шести «входів» на п'ять «виходів» [6].

Подібний підхід допомагає виявити практично **значущі функції** та згрупувати їх відповідно до **практичних цілей**. Він також допомагає виявленню окремих неявно-визначуваних елементів системи.

• Дослідження концепції

Раніше зверталася увага на необхідність пошуку **альтернативних функціональних** підходів та їх взаємозв'язку із **варіантами концепцій**. Поряд із цим, представляє практичний інтерес розглянути інші підходи до оцінки **альтернатив концепції**.

Рекомендується свідомо не звужувати коло можливих **альтернатив**, аби не втратити перспективну **концепцію**.

Відомим методологічним інструментом вибудовування можливих альтернативних варіантів **концепцій системи**, наведеним у [6], є визначення її стартової версії. Зазвичай, як таку використовують вже існуючу - *попередню систему*. Її подумки розмішують на шкалі можливих **альтернатив** зліва. Вона зручна вже тим, що всі недоліки та переваги добре відомі, як правило вивчені, підтверджені та не викликають сумнівів. Далі, рухаючись подумки вправо, усуваючи її недоліки як

функціонально, що розглядали в попередньому розділі, так і **фізично**, у тому числі новітніми **компонентами**, що знову з'явилися, можемо отримувати різні **альтернативні концепції**. Цей шлях зручний ще й тому, що менш витратний, а ризики тут цілком прогнозовані. Мінусом цього підходу «від попередньої системи» є, можливо, невелика інноваційність *концепції* нової системи. Тому подумки рухаючись «вправо» - на фланзі розташовуються системи з новітніми **інноваційними** рішеннями.

Приклад. Із недавньої історії розвитку композиційних матеріалів в авіабудуванні. До 2000-х років композити у цивільному авіабудуванні використовувалися, переважно, для виготовлення деталей несилкових конструкцій: обтічників, лючків, елементів інтер'єру, залізів тощо. Вони, звісно, покращували систему, але не кардинально. Це, щоправда, не створювало великих ризиків і економічно було маловитратно. У міру накопичення технологічного, дослідницького, розрахункового досвіду з'явився науково-технічний та виробничий доробок, який дозволив приступити до створення відповідальних силових конструкцій із композитних матеріалів. Так, у новому столітті Boeing розробив технологію виробництва фюзеляжу із композиту методом намотування, а Airbus розробив альтернативну технологію – складання фюзеляжу літака А-380 із композитних панелей. В обох випадках це призвело до революції у виробництві цивільних літаків. Кардинально зменшилася кількість робочих, змінилися базові технології, вдалося підвищити ефективність експлуатації (рис. 3.13).

Але, оскільки наш матеріал готується в 2021 році і на дворі «гуляє «COVID-19», зазначимо, що важко досягнута ефективність, сьогодні не може бути ефективно реалізована. Пасажиропотік і, відповідно, експлуатація авіаційного цивільного парку літаків скоротилася у кілька разів.

Типовими інструментами пошуку новаторських **концепцій** є груповий мозковий штурм і запропонований у роботі [6] метод

інтелект-карт (mind maps). У цьому методі наочні образи використовуються для допомоги у мозковому штурмі нових ідей. Дослідники рекомендують також не виключати із кола аналізованих **концепцій**, які можуть не задовольняти всім критеріям ефективності, залишаючи їх як запасні для подальшого розгляду. Слід також відтягувати вибір **«єдино-правильної концепції»**, аж до виконання масштабного ескізного проєкту, коли ймовірність успіху вже очевидніша. Або коли можливе ще повернення до однієї із відкладених **альтернативних концепцій**.



а)



б)

Рис. 3.13. Дві альтернативні технології виробництва фюзеляжу літака із композиційних матеріалів: а) Boeing – методом «намотування»; б) Airbus – методом «викладки» та складання панелей з композиційних матеріалів [67, 68].

Аналіз і відбір перспективних концепцій подальшого розгляду зазвичай виконуються зіставленням показників функціонування конкурентних концепцій із відповідними

показниками ефективності. І тому використовуються різні галузеві моделі.

- **Валідація вимог до показників функціонування**

За результатами відбору із **альтернативних варіантів** концепцій кількох кращих, найперспективніших для реалізації, кожна з яких може задовольнити вимоги призначення, що пред'являються до системи, формується перспективний склад концепцій. Звернемо увагу на те, що виявлені раніше практично значні **показники функціонування** може бути реалізовані у кожній із відібраних у перспективний склад *концепцій*. Таким чином, цей склад концепцій має задовольняти єдиному комплексу вимог до показників функціонування *системи*. Ці *вимоги* мають бути виражені у значеннях показників, які однозначно виміряні та фіксовані. Вони приймаються за основу для наступних етапів створення *системи*, аж до її фізичної реалізації.

У ході валідації *вимог* до показників функціонування *системи* виконують взаємозалежні дії:

- по-перше, порівнюються показники функціонування, типові для різних альтернативних концепцій системи;
- по-друге, здійснюється аналіз ефективності відібраних та уточнених показників, властивих різним концепціям системи стосовно вимог її призначення.

Певним підсумком процесу валідації є отримання несуперечливого набору показників функціонування системи, які мають наступний склад властивостей [6]:

1. Ці показники визначають, «що система повинна робити і наскільки добре»;
2. Ці показники фокусують характеристики у технічних термінах таким способом, що їх можна верифікувати. Ці характеристики мають стати вихідними даними для подальших проєктно-конструкторських етапів розробки системи;
3. Ці показники найбільш повно і точно мають відображати вимоги призначення, які висуваються до системи, обмеження, зовнішні інтерфейси і внутрішні взаємодії, тобто система із цими характеристиками має задовольняти вимоги призначення.

Іншим, не менш важливим результатом валідації є оформлення одержаних показників функціонування у строгу документовану форму. При цьому зазначимо, що в ході розвитку проєкту мають бути передбачені певні ітерації та уточнення окремих показників функціонування із замовником системи.

Під час документування показників функціонування необхідно враховувати, що ці дані будуть використані як основа для формування тендерних пропозицій потенційним учасником створення системи – коли її замовником виступає представник зовнішньої, відносно розробника системи, організації.

Якщо розробка концепції ініціюється самим майбутнім її творцем, тоді отримані показники функціонування є основою фіксації наступних найближчих етапів її життєвого циклу.

3.4. Етап визначення концепції системи

На цьому етапі потреби зовнішнього середовища достатньо формалізовані, їм поставлені у відповідність альтернативні варіанти концепцій, які задовольняють відповідні показники функціонування, про що свідчить проведена валідація. Тепер має бути скрупульозна робота із визначення і уточнення функціональних та фізичних характеристик створюваної нової системи (рис. 3.14).

На етапі визначення концепції необхідно якомога детальніше уявити майбутню систему, включивши до неї дані, які дозволяють побудувати кількісний прогноз показників функціонування, а також прогнози необхідного часу та витрат на забезпечення її життєвого циклу.

Зазначається, що кількість учасників розробки системи на даному етапі зростає за рахунок залучення фахівців прикладних областей знань: інженерів-конструкторів, інженерів-технологів, матеріалознавців, програмістів та інших. Підсумком цього етапу має стати вибір базового варіанта концепції - її конкретної конфігурації, яка має стати основою для подальшого розроблення та конструювання нової системи.

Завершити цей ранній етап *передрозробки* рекомендують визначенням та описом прийнятої концепції системи, а також добре документованим обґрунтуванням її технічної здійсненності та економічної обґрунтованості. Можна вважати цей документ «Версією концепції "0"». Рекомендується включення до цієї ранньої версії наступних розділів:

- оцінку процесів реалізації основних функцій;
- оцінку, у самому загальному вигляді, очікуваних ризиків;
- стратегію розроблення та ключових субпідрядників;

- підходи до проєктування;
- питання організації виробництва;
- інтерфейси із системами вищого рівня та іншими забезпечувальними системами.

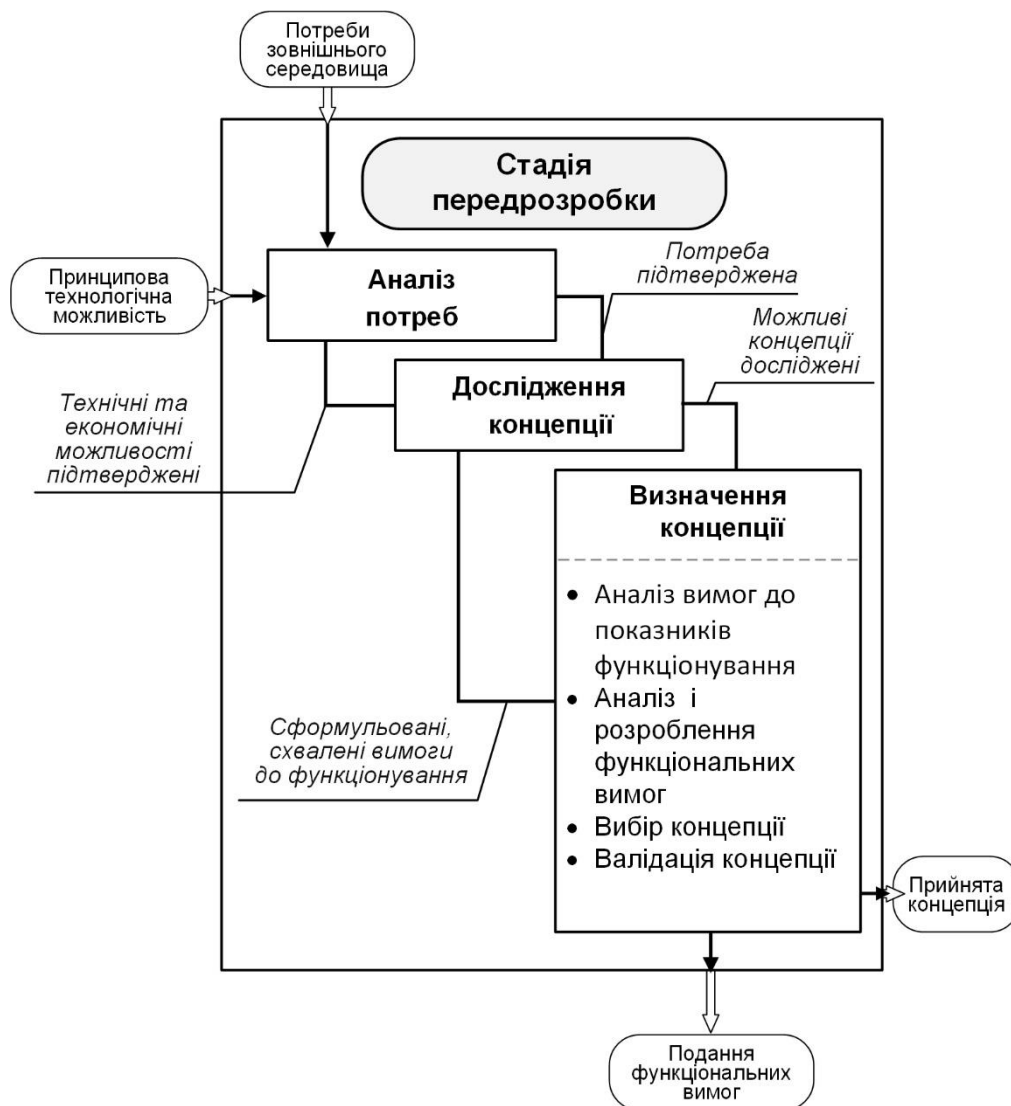


Рис. 3.14. Стадія передрозробки: етап визначення концепції.

Усі наступні стадії, по суті, будуть спрямовані на поступову фізичну реалізацію обраної концепції.

Приклад. Слід зазначити, що під час розроблення складних інженерних систем, особливо у оборонних галузях діяльності, замовник, у особливо чутливих сферах, навіть на цій стадії вибору базової концепції може не обмежуватися одним єдиним варіантом. Згадаємо один характерний недавній приклад, коли МО США фінансувало до стадії льотних випробувань два конкурентні проєкти винищувача 5-6-го покоління, згодом літаків F-35.

Як зазначено на рисунку 3.14 «вхідною» інформацією етапу є результати досліджених варіантів концепцій, обрані альтернативні варіанти та їх опис, а також схвалення вимог до показників функціонування. Додатково і бажано подати загальне бачення організаційно-договірних та правових документів, що дозволяють оцінити реальність реалізації запропонованих варіантів концепції.

Згадаємо, що виходами цього етапу є *узгоджені функціональні вимоги до майбутньої системи, прийняття концепції та концептуальна програма інженерних заходів, які дозволяють створити систему.*

Зазначимо, що якщо замовником системи є будь-який орган державної влади, який має джерелом фінансування бюджет будь-якого рівня, то для вибору підрядника розробки системи оголошується тендер.

Предметом тендеру є чи вже сформульовані замовником вимоги, чи від претендентів потрібно, по суті, взяти участь у етапі визначення вимог. Часто централізований замовник запрошує потенційних виконавців взяти участь у тендері, в умовах якого вимоги до системи сформульовані лише на рівні

загального уявлення про необхідні її функціональні можливості, основні показники та вимоги до інтерфейсу.

Для реалізації етапу визначення концепції мають бути виконані такі дії (рис. 3.14):

- Аналіз вимог щодо показників функціонування.
- Аналіз та розробка функціональних вимог.
- Вибір концепції.
- Валідація концепції.

• Аналіз вимог щодо показників функціонування

На «вхід» цього етапу із попереднього надходять вимоги до показників функціонування у прив'язці до альтернативних концепцій. На попередніх етапах розробки, у різній формі та у різних контекстах, вимоги до показників функціонування неодноразово розглядалися та уточнювалися.

На даному етапі ще раз аналізу піддається система вироблення вимог, критерії визначення їх «жорсткості»: наскільки вони обґрунтовані; наскільки їхнє виконання оцінювалося у аспекті витрат на їх досягнення, у мірі впливу на задоволення потреб.

Рекомендується ще раз і ретельніше оцінювати шкалу досягнення тих чи інших вимог та основних ресурсів, необхідних для цього.

Вважається, що вміння конфігурувати вимоги, починаючи від джерела їх появи у споживача, кореляції із реальними потребами користувача і до реалізації як показника функціонування, є однією із важливіших компетенцій *системної інженерії*. Для складних інженерних систем

необхідні якості з'являються у *системного інженера* через кілька років практики.

На даному етапі рекомендується окрему увагу приділити не лише власне основним показникам функціонування, а й супутнім. Таким найважливішим, як вимоги до сумісності із іншими системами, зовнішніми за відношенням до неї, вимоги до надійності експлуатації, вимоги до модернізації та майбутнього розвитку.

На даному етапі має бути розроблена укрупнена модель сценарію життєвого циклу, із якого обов'язково будуть важливі доповнення до показників функціонування системи протягом її життєвого циклу.

• Аналіз та розроблення функціональних вимог

На етапі визначення концепції аналіз функціонування системи починається із опису функцій компонентів системи. На цьому етапі зазвичай функціональна конфігурація рівня системи загалом відома, вона виконувалася на попередньому етапі. У будь-якому разі, на даному етапі є знання, що дозволяють визначити як мінімум кілька концепцій «верхнього» рівня. Для декомпозиції функцій системи у опис функцій її компонентів може бути виконаний наступний набір типових дій [6]:

- ідентифікувати функціональне середовище, як це раніше приставлялося, за його типом: сигнали, дані, матеріали, енергія, зусилля;
- ідентифікувати функціональні компоненти, як також це раніше представлялося; операції над кожним із п'яти виділених функціональних середовищ – п'ятьма-шістьма базовими функціональними елементами; це дозволяє

конфігурувати необхідні функції системи із підібраних функціональних елементів;

- знайти та перевірити відповідність вимог до показників функціонування компонентів їх характеристик; якщо вдається підібрати таку відповідність, підтверджується правильність вибору функціонального елемента;
- згрупувати відібрані функціональні елементи у підсистеми;
- інтегрувати конфігурований варіант системи із зовнішніми елементами оточення: органами управління, джерелами енергії та, можливо, низкою інших.

Фахівці не рекомендують на цьому, одному із ранніх етапів, займатися питаннями оптимізації функціонування системи. Це потрібно зробити, починаючи із розроблення фізичних компонентів системи.

Зазвичай використовуються кілька формальних методів та інструментів графічно-логічного представлення функціональних блоків системи та взаємодії між ними.

Як і раніше, часто використовується метод функціонального моделювання та опису функціонування системи – IDEF (I-CAM DEFinition або Integrated DEFinition), див. рисунок 3.15 [45].

В основі цього опису імітатор – блок, зображений прямокутником. У прямокутнику може бути список функцій, які виконуються цим об'єктом, іноді його залишають порожнім. Входи – ліворуч, виходи – праворуч, керовані сигнали – зверху, введення механізмів – знизу.

У кожній галузі зазвичай існують свої традиції, свої правила подання та опису функціональних моделей. Сутність їх єдина – описати і не втратити жодну із функцій та пов'язати їх із виконавчим модулем.

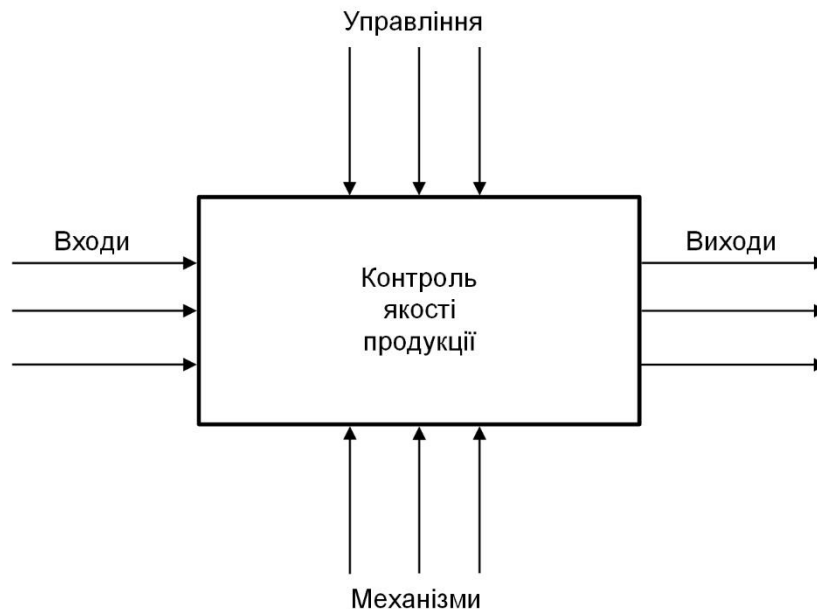


Рис. 3.15. Подання елемента функціональної моделі в нотації IDEF0 [45].

Певні функціональні вимоги, отримані в результаті проведеного аналізу функціонування системи як певний їх набір чи склад, служать входами стадії «Розробки», її першого етапу – ескізного проєктування.

До важливих показників функціонування на даному етапі відносять, безумовно, оцінку рівня витрат, необхідних на розробку, виробництво, підтримку системи в експлуатації, а також для її утилізації. Також має бути врахований термін служби системи.

На окрему увагу заслуговують також показники, які неможливо виміряти, але вони важливі. Їм слід також приділити увагу та знайти можливість описати. Наприклад, інтерфейсні вимоги між оператором та системою, у тому числі кермо, пульт, джойстик, важіль управління.

Якщо розроблювана система має прототип, то це значно полегшує завдання:

- по-перше, багато подібних показників мають аналоги із передісторією;
- по-друге, є можливість отримати аргументовану думку користувачів.

В результаті всіх цих аналітичних дій розробник системи отримує можливе розуміння задачі, яка підлягає вирішенню, вираженої у формальній, вимірюваній або добре описаній формі, а також альтернативні способи її вирішення.

На цьому етапі функціональні вимоги вважаються ще орієнтовними, вони підлягають уточненню під час розроблення архітектури та будуть включені в документарному вигляді до вимог під час вибору концепції системи, яку назвемо *базовою*.

• Вибір концепції

Під час вибору концепції приймається низка дуже важливих рішень, від яких залежатиме життєздатність та ефективність майбутньої системи: саме зараз, під час вибору базової концепції із альтернатив формується її майбутній образ, риси: основні показники функціонування, вартості та корисності нової системи. Відповідно до методу системної інженерії рекомендується здійснювати вибір із кількох альтернатив. Цей процес називають «аналізом компромісів» або «вивченням компромісів», які рекомендовано використовувати на всьому протязі розроблення системи.

Розробка альтернативних варіантів концепції на даному етапі передбачає формування набору альтернатив і конфігурування їх

до різних існуючих фізичних компонентів системи. Це іноді називається - **альтернативними способами реалізації функцій**.

Типовим варіантом відповіді, який має бути визначений на цій стадії, чи слід конфігурувати кілька функцій в одному фізичному компоненті, або розширювати кількість компонентів? Скільки підсистем резервування найважливіших функцій слід передбачити?

Бажано підсистеми резервування конфігурувати у окремі модулі. Скільки їх має бути? Скільки їх за мінімумом може бути? Які параметри резервування?

Приклад. Відомо, що в критичних підсистемах літаків – наприклад, «випуск шасі», передбачалося застосування п'яти підсистем резервування, які використовують різні середовища функціонування: механічну, гідравлічну, електричну, змішану, ручну. Скільки вистачає? Скільки виправдано?

У відповідальних та складних підсистемах прийнято проводити моделювання альтернатив. Розробляються моделі, які володіють найважливішими ознаками системи та моделюється їхня поведінка, на основі чого проводиться вибір найкращої альтернативи. Модель розробляється із урахуванням побудови багатofункціональних потоків.

В останні десятиліття вдалося розробити ефективні методи та інструменти імітаційного, математичного моделювання для різних областей функціонування систем, що дозволяє істотно скорочувати терміни та інші ресурси на розроблення фізичних моделей для аналізу компромісів.

Основною метою аналізу компромісів на даному етапі є оцінка між собою можливих запропонованих альтернатив за такими типовими складовими:

- показниками функціонування;
- витратами фінансових та інших ресурсів, тривалістю створення;
- ризиками високого рівня, у тому числі за наведеними вище складовими.

Необхідно враховувати не лише окремі показники, а й баланс компромісів з-поміж них.

Очевидно, що навіть ці три найважливіші показники – критерії вибору системи, знаходяться між собою у тісному взаємозв'язку. Наприклад, показники функціонування - чим вони вищі, тим більші витрати на розробку та вищі ризики можливості їх досягнення, але нижчі ризики реалізації систем споживачеві.

Під час оцінювання альтернатив рекомендується:

- по-перше, віддати перевагу поетапно-послідовному відбору, що дозволяє, як буде показано нижче, найповніше оцінити альтернативні варіанти;
- по-друге, не поєднувати показники в єдиний коефіцієнт, а розглядати альтернативи за кожним критичним показником окремо.

У роботі [6] наведено вісім рекомендованих поетапно-послідовних кроків відбору альтернативних концепцій.

На перших двох кроках зосереджуються на кількості аналізованих альтернатив. Їх має бути достатньо, аби вони покривали всі виявлені потреби, але не так багато, щоб ускладнити аналіз.

На третьому та четвертому кроці вибираються критичні показники функціонування, оцінюється досягнутий баланс

критичних показників функціонування щодо витрат, ризиків, термінів їх досягнення.

П'ятий та шостий кроки відповідають призначенню вагових коефіцієнтів, пріоритетів вибору та ранжируванню за ними альтернативних варіантів концепції.

Сьомий та восьмий кроки полягають у виключенні проаналізованих варіантів концепції за попередніми результатами оцінки та вибору найкращого варіанту. Якщо з першого разу це не вдається, рекомендується повернутися на два попередні кроки та повторити оцінку та вибір.

Будь-яких єдиних правил оцінки компромісів немає. Багато що залежить від кваліфікації та наполегливості системних інженерів та менеджерів проєкту.

• **Валідація концепції**

Основою цього процесу є моделювання оточення системи та моделювання поведінки найкращих із можливих чи найкращих варіантів концепції системи на відповідність вимогам замовника чи споживачів.

За останні десятиліття розроблення моделей оцінки ефективності стала популярним напрямом прикладних досліджень. Це зазвичай комп'ютерно-імітаційні моделі, які дозволяють варіювати як параметрами навколишнього середовища, так і показниками функціонування системи.

Можливо, це будуть типові імітаційні моделі, прийняті в тій чи іншій корпорації, можливо, вони вже використовувалися на попередніх, більш ранніх етапах формування концепції. Якщо відповідних моделей немає, розроблення адекватних імітаційних моделей має стати частиною завдань розроблення

концепції. Як зазначають дослідники, з цієї та інших причин, задовго від дати передбачуваного тендеру на створення системи, фахівці зацікавлених корпорацій та інших суб'єктів науково-технічної діяльності активно готують імітаційні моделі, які надають їм поради.

На етапі оцінки обраного варіанта концепції, коли система існує в основному у функціональному поданні, саме аналіз її поведінки за результатами моделювання стає можливим.

Комп'ютерні моделі дозволяють успішно піддавати валідації як системи загалом, так і їхні підсистеми та компоненти. Розроблено багато програм для моделювання аеродинамічної поведінки, гідродинаміки, тепломасопереносу, електродинамічних процесів. Моделюванню піддаються різні організаційні та техніко-економічні рішення.

Мається на увазі, що в процесі валідації вдається виявити одну найкращу концепцію, яка перевершує всі інші. Найчастіше це не вдається і **конкурентними залишаються декілька із варіантів, що розглядаються**. Причина тут може бути не лише і не стільки у недосконалості оцінки показників функціонування майбутньої системи, а в більшій мірі у нашому недостатньому знанні комплексу зовнішніх впливів. І цього вже не усунути, підвищуючи точність моделювання.

Тоді можливе застосування спеціальних процедур вибору - від просування декількох варіантів за наступними етапами створення системи, до проведення консультацій, мозкових штурмів із найбільш значущими стейкхолдерами та спонсорами майбутньої системи.

Підсумком, який слідує за валідацією найкращої, а, можливо, і найкращих кількох концепцій, є розробка укрупнених планів,

моделей, графіків робіт, у тому числі основоположних: побудова ієрархічної структури робіт проєкту (WBS) та плану управління системної інженерії (SEMP)¹⁷.

Окрім цього розробляється низка інших планів, які допомагають учасникам майбутнього проєкту системи визначити у її життєвому циклі своє місце та роль. Особливу увагу у цих планах має бути приділено постачальникам ключових компонентів, модулів та підсистем.

Очевидно, що інтеграція робіт із формування найважливіших фрагментів плану в управлінні проєктом та управлінні системою інженерії – є втіленням єдності дій проєктних менеджерів та системних інженерів.

Вважається, що формуванням цієї документації завершується етап **визначення концепції**.

3.5 Підсумки

- **Вираз потреб з позиції системного інженера**

Потреби зовнішнього середовища, зазвичай, є мотиваційними чинниками початку робіт зі створення нової системи. Можна досить умовно розділити ці потреби на явно виражені і неявно виражені.

Явно виражені потреби можуть бути формалізованими, документованими чи неформалізованими та недокументованими. У першому випадку, очевидно,

¹⁷ SEMP - визначає основні види дій, притаманні для системної інженерії: управління програмною розробкою; процес системної інженерії – вимога аналізу функціонування, компроміси; інтеграція із суміжними для системи областями проєктування, відповідальними за надійність, виготовлення, безпеку, ремонтпридатність, ергономічність [6].

навантаження стосовно завдань із формалізації та документування лежить на організації, яка знаходиться у зовнішньому середовищі за відношенням до розробника системи. У разі явно вираженої потреби, але неформалізованої та недокументованої, а також у разі явно не вираженої потреби, але потенційно актуальної, завдання виявлення потреби в системі, її базових характеристиках, близьких аналогах, реалізованих цілях, лежить на системних інженерах і менеджерах проекту.

• Підсумки етапу аналізу потреб у системі

Основною метою етапу аналізу потреби у системі є формування образу потреби у взаємозв'язку із можливим задоволенням її, шляхом розроблення нової системи. Далі необхідно документувати цю можливість, у найзагальніших рисах, переконати майбутніх споживачів у прийнятності фінансових та тимчасових витрат на її створення, отримати схвалення від них для переходу до наступних стадій розроблення концепції.

Розглянуто чотири типові дії розробників, які рекомендуються для реалізації етапу аналізу потреб у системі:

- Системний аналіз (аналіз вимог до майбутньої системи).
- Аналіз та розроблення функціональних вимог (функціональний опис).
- Оцінка здійсненності (описи фізичної реалізації).
- Валідація потреб (валідація проєктних рішень).

Під час аналізу потреби було звернено увагу на необхідність виконання всебічної оцінки ринку – як можна на найдальшу

його перспективу, а також на необхідність оцінки розвитку прикладних НДДКР у сфері створення системи.

Підкреслено, що ефективним інструментом аналізу на цьому етапі є побудова дерева високорівневих цілей – не глибше 2-3-х рівнів, які на наступному кроці робіт будуть використані для ідентифікації функціональних вимог системи.

Наступним кроком в осмисленні концепції є визначення принципової здійсненності поставленої вище цілі та підцілі системи шляхом реалізації їх через відповідну високорівневу модель. Вже на цьому кроці звертається увага на важливу можливість фізичної реалізації основних виявлених функцій.

На наступному кроці - первинній оцінці здійсненності системи, розробники мають вести потенційних клієнтів по шляху, який розкриває можливості матеріалізації окремих найважливіших функцій системи та системи в цілому.

Важливим кроком на цьому ранньому етапі є процес валідації потреб. В даному випадку мова зазвичай йде про аналіз експлуатаційної ефективності, яка представляється, найчастіше трьома формами визначення: вимірюваними, імовірнісними та логічними. У різних сферах діяльності існують відповідні моделі, якими рекомендується користуватися.

• Підсумки етапу дослідження концепції системи

Наголошується, що розпочинати цей етап розроблення концепції має сенс, якщо на попередньому етапі – «аналіз потреб у системі», загалом досягнуто порозуміння, стосовно основних сутностей майбутньої розроблюваної системи, що включають вимоги до призначення системи, основні цілі, які досягаються системою, ресурсні можливості, які можуть бути

залучені до її створення. Зазначається, що на цьому ранньому етапі потенційні спонсори часто ще не готові схвалити подальшу розробку і тоді, це стає зоною відповідальності та ризику розробників систем.

Рекомендовано виконувати наступні чотири дії:

- Аналіз вимог призначення.
- Аналіз та розроблення функціональних вимог.
- Дослідження концепції.
- Валідація вимог до показників функціонування.

Аналіз вимог призначення, виконаний на даному етапі, відрізняється від попереднього більш скрупульозною та системною роботою. Як правило, передбачають залучення системних аналітиків та спеціалістів із розроблення вимог. Аналізу піддається сформований на попередньому етапі набір вимог, який підлягає оновленню на даному етапі. Для цього виконується оцінка вимог на «несуперечливість», використовуються спеціальні критерії, які дозволяють відсівати некоректні вимоги. Рекомендується особливо звертати увагу на формулювання відповіді на запитання «навіщо» із оцінкою витрат на задоволення «навіщо». Наводиться сім типових критеріїв, які рекомендуються для відсіву некоректних вимог призначення. Незважаючи на обмеженість коштів у розробника майбутньої системи на даному етапі її створення, проте рекомендовано прагнути до того, щоб на фініші цього етапу вимоги призначення були можливо коректно сформульовані та узагальнені у несуперечливий документ.

Визначення вимог і показників функціонування системи та її основних підсистем і елементів є наступним кроком етапу дослідження концепції. Основним завданням на ньому є

перетворення вимог призначення, сформульованих із позиції користувача системи на вимоги функціонування, виражених у формі технічних характеристик. Слід ще раз проаналізувати, конкретизувати показники функціонування та перейти до наступного кроку функціонального опису – опису функцій підсистем, їх елементів, а також їх візуалізації у вигляді фізичних компонентів.

Показано, що процес переведення вимог призначення до вимог функціонування має недетермінований характер. Тобто одним і тим самим вимогам призначення можна поставити у відповідність множину наборів показників функціонування.

Найчастіше під час виборів концепції домінуючими якостями розробника є досвід, інтуїція, евристика. Тим не менш, існують практичні рекомендації, алгоритми дій, які дозволяють системним інженерам уникнути помилок через можливу втрату неявно видимих функціональних елементів.

Дослідження концепції в системі, що здійснюється на цьому етапі, ставить своєю основною метою не випустити із уваги альтернативні концепції, які задовольняють вимогам призначення, що реалізуються функціонально та фізично. Розглянуто ефективний методологічний інструмент аналізу концепцій – вибудовування лінійки можливих альтернативних концепцій, починаючи із існуючої попередньої системи до можливо найбільш інноваційної. Ще одним типовим інструментом пошуку альтернативних концепцій є груповий мозковий штурм. Рекомендується не виключати зі складу альтернативних концепцій, ті, які не задовольняють усім критеріям ефективності, оскільки під час ітерацій деякі критерії можуть бути переглянуті.

Валідація вимог до показників функціонування - один із найважливіших результатів, який визначає отримання груп відібраних альтернативних варіантів концепції системи, які володіють несуперечливим набором показників функціонування системи. Вони мають визначати:

- що система має робити і наскільки добре має це робити;
- характеристики системи, виражені в технічних термінах, які можуть бути піддані верифікації;
- вимоги призначення до системи.

• Підсумки етапу визначення концепції системи

На цьому етапі роботи потреби зовнішнього середовища, в основному формалізовані, їм поставлені у відповідність альтернативні варіанти можливих найбільш перспективних із розглянутих концепцій. Основним завданням цього етапу є вибір базового варіанта концепції – її конкретної конфігурації, яка має стати основою для наступної стадії формування розробки системи, а також укрупненої програми інженерних розробок, що дозволяють створити систему.

Рекомендований склад дій, що дозволяє реалізовувати етап визначення концепції системи:

- Аналіз вимог щодо показників функціонування.
- Аналіз та розробка функціональних вимог.
- Вибір концепції.
- Валідація концепції.

Аналіз вимог до показників функціонування виконувався на 2-х попередніх етапах. На цьому етапі основна увага приділяється системі вироблення вимог, критеріям їх

визначення, обґрунтованості «жорсткості» деяких із них. Підкреслюється, що вміння змінювати вимоги, простежуючи їхню відмінність від джерела появи у споживача і до реалізації у якості показників функціонування, це одна із найважливіших компетенцій системної інженерії.

На даному етапі має бути розроблена укрупнена модель сценарію життєвого циклу системи, з якої розробник зможе отримати важливі доповнення до показників функціонування системи. Додатково піддаються аналізу показники, які можуть бути виміряні – зокрема ергономічні. В результаті цієї аналітичної роботи розробник системи отримує можливе повне розуміння задачі, що підлягає вирішенню, вираженої у формальній, вимірюваній або добре описаній формі, а також альтернативні способи її вирішення.

Аналіз та розроблення функціональних вимог відрізняється від виконаних на попередніх етапах, коли формувалася функціональна конфігурація рівня всієї системи. На даному етапі є дані, що дозволяють мати, як мінімум, декілька варіантів концепцій «верхнього» рівня.

Пропонується певний алгоритм декомпозиції функціональних складових частин, який використовується для перспективних альтернативних варіантів концепції системи і який скорочено складається із наступних дій:

- ідентифікації функціонального середовища;
- ідентифікації функціональних компонентів;
- пошуку та перевірці відповідності вимог до показників функціонування компонентів, їх характеристик;

- групування в підсистеми та, нарешті, інтеграції конфігурованого варіанта системи із зовнішніми елементами оточення.

Певні функціональні вимоги, отримані в результаті цих та інших засобів та інструментів моделювання, є «входами» стадії «Розробки», її першого етапу – ескізного проєктування. Вони, як і раніше, вважаються орієнтовними і такими, що підлягають уточненню на наступному кроці – виборі концепції.

Вибір концепції реалізації системи є надзвичайно важливим етапом, який багато в чому визначає майбутнє системи: саме на ньому формується майбутній образ системи, основні показники функціонування, вартості та корисності.

Відповідно до методологічних основ системою інженерії вибір рекомендується здійснювати із декількох варіантів, використовуючи інструменти «аналізу компромісів» та «вивчення компромісів».

На даному етапі передбачається конфігурування певного перспективного набору альтернатив відповідним фізичним компонентам системи, називаючи це альтернативними способами реалізації функцій. У відповідальних та складних системах прийнято проводити моделювання альтернативних варіантів.

Типовими показниками, за якими найчастіше здійснюється аналіз компромісів є: показники функціонування системи, витрати фінансових та інших ресурсів, тривалість циклу створення, ризику високого рівня.

Основою валідації майбутньої системи на цьому етапі **визначення концепції** є моделювання навколишньої системи та моделювання поведінки найкращих (найкращої) із можливих

аналізованих альтернатив концепції на відповідність вимогам замовника або споживачів.

Ефективним та затребуваним інструментом валідації стали комп'ютерно-імітаційні моделі, які дозволяють варіювати як параметрами оточуючого середовища, так і показниками функціонування системи. Ці моделі та їх інструментарії дозволяють піддавати валідації як систему загалом, так і її підсистеми та компоненти.

Наголошується, що на даному етапі розвитку системи, вона існує в основному у функціональному поданні, тому аналіз її поведінки можна здійснювати лише за результатами моделювання.

Мається на увазі, що в процесі валідації вдасться виявити одну найкращу концепцію, яка перевершує всі інші, тим не менш доцільно не звужувати розгляд одного єдиного варіанту. Практика свідчить, що потрібно мати запасні варіанти.

Питання для самоконтролю глави 3

1. Наведіть варіант класифікації потреб зовнішнього середовища з позиції системної інженерії.
2. Які особливості етапу аналізу потреб у системі на стадії передрозробки?
3. В чому сутність системного аналізу на етапі аналізу потреб у системі (на стадії передрозробки)?
4. В чому сутність аналізу і розроблення функціональних вимог на етапі аналізу потреб у системі (на стадії передрозробки)?

5. В чому сутність оцінки здійсненності на етапі аналізу потреб у системі (на стадії передрозробки)?
6. В чому сутність валідації потреб на етапі аналізу потреб у системі (на стадії передрозробки)?
7. В чому сутність аналізу вимог призначення на етапі дослідження концепції системи (на стадії передрозробки)?
8. В чому сутність аналізу та розроблення функціональних вимог на етапі дослідження концепції системи (на стадії передрозробки)?
9. В чому сутність дослідження концепції на етапі дослідження концепції системи (на стадії передрозробки)?
10. В чому сутність валідації вимог до показників функціонування на етапі дослідження концепції системи (на стадії передрозробки)?
11. В чому сутність аналізу вимог до показників функціонування на етапі визначення концепції системи (на стадії передрозробки)?
12. В чому сутність аналізу і розроблення функціональних вимог на етапі визначення концепції системи (на стадії передрозробки)?
13. В чому сутність вибору концепції на етапі визначення концепції системи (на стадії передрозробки)?
14. В чому сутність валідації концепції на етапі визначення концепції системи (на стадії передрозробки)?

Глава 4: Стадія розробки системи

4.1 Етап ескізного проєктування

На цьому етапі життєвого циклу необхідно значно знизити невизначеність системи, властиву етапу визначення концепції. Забезпечується це за рахунок додаткового аналізу функціональних вимог із урахуванням їхньої простежуваності відносно вимог призначення та вимог до показників функціонування, всеосяжного моделювання, створення зразків, моделей демонстраторів компонентів та підсистем, дослідних образів-демонстраторів.

Найважливішою метою етапу є зниження ризиків проєкту до рівня ризиків від використання в системі підсистем і компонентів, які пройшли раніше валідацію.

Важливим напрямом досягнення мети є реалізація процесів та дій, що дозволяють подати визначення та опис системи не у функціональному вигляді, а у формі фізичних модулів та компонентів, які пройшли валідацію, що супроводжується проєктною документацією, яка дозволяє виконувати інженерно-технічні розробки. На момент завершення етапу повинні бути усунені найзначніші неоднозначності вихідних вимог до системи. Образно кажучи, із багатьох можливих варіантів повинен бути обраний базовий, реалізований в ескізному поданні, сконфігурований із модулів і компонентів, що пройшли валідацію, і який дозволяє проводити невеликі зміни, що здійснюються постачальниками цих модулів і компонентів.

При цьому може передбачатися вдосконалення їх функціональних показників за рахунок переважно підвищення експлуатаційної ефективності.

Тривалість і склад робіт етапу ескізного проєкту дуже різняться залежно від категорії, обсягу запозичення основних проєктних рішень нової системи стосовно попередньої.

Найменш витратною за ресурсами є категорія систем, яка успадковує від системи-попередника основні базові вимоги, функціональні та експлуатаційні характеристики.

Приклад. Розробка системи – демонстратора Ан-132Д на базі існуючого літака Ан-32. Тут були залишені без зміни основні компоновальні рішення, але були посилені крило та вузол його з'єднання із центропланом, подовжений фюзеляж за рахунок додаткової вставки, замінені двигуни.

В результаті фінансові та тимчасові показники створення системи були скорочені до мінімуму і літак був направлений на льотні випробування через 2 роки від моменту підписання контракту із замовником.

Найвитратнішими є складні інженерні системи, що передбачають широке використання інноваційних технічних рішень та технологій, які не застосовуються у системах-попередниках.

Приклад. Уже згадуваний раніше літак Lockheed Martin F-35 Lightning II належить до сімейства малопомітних багатофункціональних винищувачів-бомбардувальників п'ятого покоління. Він у своєму класі не має близьких аналогів за найважливішими функціональними, експлуатаційними характеристиками. Під час його створення використовували нові розробки у галузі матеріалознавства, технології виробництва, бортового навігаційного устаткування та багато інноваційних рішень, які раніше не використовувались в авіабудуванні. Вартість програми розробки на квітень 2011 року становила 56 млрд. дол., згідно із заявою президента США Д. Трампа, повна вартість проєкту склала 400 млрд. дол., а повний цикл розробки та виробництва, починаючи із конкурсів «аванпроєктів» (середина 90-х років) та закінчуючи введенням у експлуатацію (з 2012 року для навчальних цілей), склали понад 20 років [69].

Етап ескізного проєктування завершується розробкою прототипу, який пройшов валідацію (моделі-демонстратора,

зразка). Ці результати стають входом до етапу технічного проектування. Тобто вимоги до того, що система має виконувати, матеріалізуються у вимоги, як необхідні функції мають бути реалізовані в конкретних підсистемах, компонентах, субкомпонентах системи.

До виходів цього етапу відносять також оновлену ієрархічну структуру робіт проекту створення цієї системи [70].

Таким чином, розробником системи повинен бути продемонстрований цілісний технічний підхід до її створення, загальна структура організації робіт, а також підтверджуючі дані щодо валідації основних підсистем та компонентів.

Якщо ці аргументи будуть визнані достатньо переконливими, зумовленими, тоді відповідні особи, які приймають рішення, можуть надати дозвіл на подальше розроблення системи.

Зазвичай виділяють чотири основні дії етапу ескізного проектування, загалом типові для методології системної інженерії:

- Аналіз функціональних вимог.
- Аналіз функціонування.
- Розроблення ескізного проекту системи, який включає розробку всіх виявлених нових компонентів, у ряді випадків також і підсистем, які вимагають проектування та апробації, а також відпрацювання інтерфейсів сполучення їх між собою та із зовнішнім середовищем.
- Проведення підтверджуючих випробувань новостворених компонентів, підсистем, у ряді випадків – їх прототипів (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Стадія розробки: етап ескізне проєктування.

• Аналіз функціональних вимог

На етапі ескізного проєктування під час аналізу вимог фокусуються на досягненні двох основних цілей:

- чергової ітерації для перевірки актуальності функціональних вимог до системи, визначених на попередніх етапах.
- виявленні у прийнятій до розробки концепції системи вимог, які не можуть бути задоволені за рахунок використання раніше апробованих у попередніх системах проєктних рішень

і, відповідно, реалізованих за допомогою відомих компонентів та підсистем.

На даному етапі рекомендується якнайретельніше дослідити сформульовані вимоги. Окремо необхідно звернути увагу на простежуваність вимог – чи є суттєвий зв'язок між функціональними вимогами і показниками функціонування. Особливо слід розглянути вимоги до системи, які поки що не вдалося задовольнити достатньою мірою. Рекомендується налагодити комунікації із майбутніми користувачами системи, можливо уточнивши, видозмінивши або трансформували в результаті уточнень вимоги до рівня їхнього можливого задоволення на наступних етапах розробки.

Приклад. На етапі ескізного проектування під час опрацювання вимог до рампи виникла необхідність запровадження додаткової функції в системі транспортного літака – «функції присідання шасі». Таким чином, було виявлено значний компонент системи, який раніше не застосовувався і який вимагає нової розробки.

На цьому етапі, за відгуками фахівців, виявляються не менше 25-30% елементів, що потребують спеціальної розробки. Так, наприклад, під час створення літака Ан-124 «Руслан» на цьому етапі з'ясувалося, що панелі для майбутніх крил, які постачаються металургійними заводами, мали недостатні габарити - 7,5 метрів. За довжини крила близько 25 метрів знадобилося би запровадження кількох додаткових стиків, що збільшило би вагу конструкції на кілька тон. Теж стосувалося і габаритів обшивальних листів, їх довжина та ширина виявилися недостатніми для ефективного використання в конструкції. Потрібно було врахувати та реалізувати нову вимогу – забезпечити виготовлення та постачання великогабаритних напівфабрикатів завдовжки до 25 метрів. Вироблення та прийняття подібних рішень повинні бути передбачені на етапі ескізного проектування.

Вважається, що після стадії передрозробки, більшість компонентів системи повинна бути відома і випробувана на

попередніх системах. **Основний зміст етапу ескізного проєктування полягає у пошуку та розробленні тих компонентів системи, які не були до теперішнього моменту розроблені або не були доведені до масштабного практичного використання.**

Також відомо, що в розроблюваній системі може бути передбачено використання підсистем, які вимагають, у свою чергу, розроблення або істотної адаптації до нових умов застосування. Якщо такі підсистеми розробляються сторонніми організаціями, тоді до кола завдань системного інженера на етапі ескізного проєктування входить формування плану спільних робіт із розробниками підсистем, участь у ньому, моніторинг його виконання та доведення підсистем до атестації і застосування в системі.

Підсумком етапу ескізного проєктування є валідація як новостворених компонентів системи, так, за необхідності, і раніше використаних в інших системах та проєктах.

У таблиці 4.1 для новостворених компонентів достатньо умовно, але наочно наведено приклад того, що характер інноваційного рішення: розширення функціональних можливостей; нова функція; нова реалізація; нова технологія – визначають склад необхідної розробки та мету валідації.

Різнобарвні стовпці у другій графі показують різну категорію інноваційного рішення: функціональну, фізичну чи технологічну. Висота стовпців характеризує необхідний рівень потреби у розробці залежно від характеру інновації, де за «1» – прийнято максимально можливий рівень потреби у розробці.

Таблиця 4.1. Типовий характер інновацій та пов'язані з ними потреби у розробках та валідації.

Характер інновації	Рівень потреби у розробці	Склад розробки	Мета валідації
Розширення функціональних можливостей відомого компонента		Проектування та випробування на імітаційній моделі функціональних можливостей	Оцінка реалізації функції
Нова функція, у відомих фізичному та технологічному середовищах		Проектування, виготовлення та випробування прототипу	Оцінка реалізації функції
Нова фізична реалізація; функція та технологія відомі		Ескізне проектування, виготовлення та випробування експериментальної моделі	Оцінка можливості використання у технічному проекті
Нова технологія виробництва; функція та реалізація перевірені		Проведення технологічних досліджень, апробація технології	Оцінка можливості використання у технології виробництва

Категорії інноваційних рішень: фіз. - фізичні; функц. - функціональні; технолог. - технологічні.

• Аналіз функціонування

Очевидно, що у нових системах, функціонування яких передбачається у надзвичайно складних умовах та тривалий час, для забезпечення цих та інших спеціальних вимог необхідним стає застосування унікальних елементів. Це, у свою чергу, тягне за собою збільшення складності відповідних компонентів систем. Як правило, це вимагає спеціальних досліджень та подальшого розроблення прототипу для перевірки правильності вибраних проєктних рішень.

Найчастіше виявляються три типи компонентів, які вимагають розроблення [6]:

- компоненти, у яких показники функціонування мають значно перевищувати раніше досягнуті межі;
- компоненти, що реалізують критичні, складні функції;
- компоненти, досвід взаємодії із середовищем яких не досліджений;

Важливими діями на даному етапі є виявлення елементів системи, для яких показники функціонування мають значно перевищувати раніше досягнуті межі в попередніх системах або близьких аналогах. Якщо для реалізації будь-якої функціональної вимоги характеристики елемента системи мають бути вищими, ніж відомі раніше, тоді потрібна або знову розробка компонента або зміна вимог, що на даному етапі вкрай небажано.

Приклад. З історії створення літака Ан-124 «Руслан». Вимоги аеродинаміки та великих обсягів палива в крилі для досягнення заданої дальності польоту спричинили необхідність розробки спеціального профілю крила – більш «товстого» у прикореневій частині і який не створює наднормативного аеродинамічного опору. Розглядалися десятки

профілів із різними радіусами носка, із різними кутами відгину хвостової частини профілю, із різними формами верхньої та нижньої поверхонь крила..

В архівах АНТК «Антонов», серед іншого, зберіглося багато лист-вказівок співробітникам Генерального конструктора О. К. Антонова, що свідчить про постійну участь його особисто у розробленні та прийнятті найважливіших питань, які виникали у ході створення систем літака Ан-124 «Руслан». Цей процес докладно та цікаво описаний у вже згадуваній колективній монографії (рис. 4.2–4.4) [43].

В результаті було спроектовано крило «помірно–надкритичного профілю», що дозволяє підвищити аеродинамічну якість на 4,5% та збільшити обсяг палива на 10% [43]. На цьому етапі ескізного проєктування складності не закінчилися, оскільки обдування крила в аеродинамічній трубці показали, що у літака з новим крилом є локальна нестійкість на крейсерських швидкостях у зоні великих кутів атаки. Літак вже знаходився в дослідному виробництві - будувався перший льотний його екземпляр, а пошуки рішення зняття локальної нестійкості тривали ще більше 2-х років. У результаті було запропоновано спеціальну систему використання інтерцепторів, яка вимагала конструктивного доопрацювання крила.

Таким чином, на пошуки оптимального рішення та його валідацію пішло більше 5 років. Але це забезпечило реалізацію необхідних вимог до системи за рахунок застосування нових неперевіраних практикою компонентів, що мали критичне значення для системи.

Наведений приклад наочно ілюструє участь системного інженера – Генерального конструктора в ініціації та виробленні найважливіших проєктних рішень стосовно нового унікального літака – системи, в сучасному розумінні.

На окрему увагу заслуговує наведений в тій же монографії фрагмент Програми №1 експериментальних досліджень аеродинамічного компонування планера літака Ан-124 «Руслан», що підтверджує надзвичайно високий рівень організації робіт за проєктом створення літака загалом (рис. 4.5).

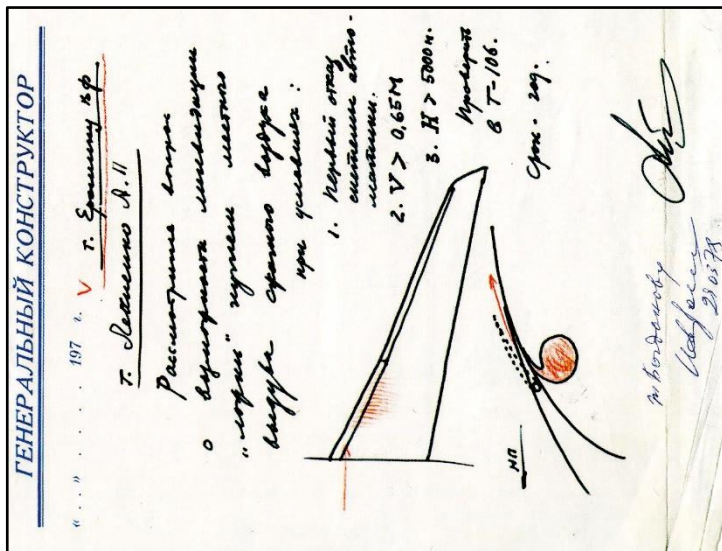


Рис. 4.3. Архівні матеріали АНТК «Антонов», що свідчать про унікальну організацію робіт та участь у них Генерального конструктора під час створення літака Ан-124 «Руслан» [43].

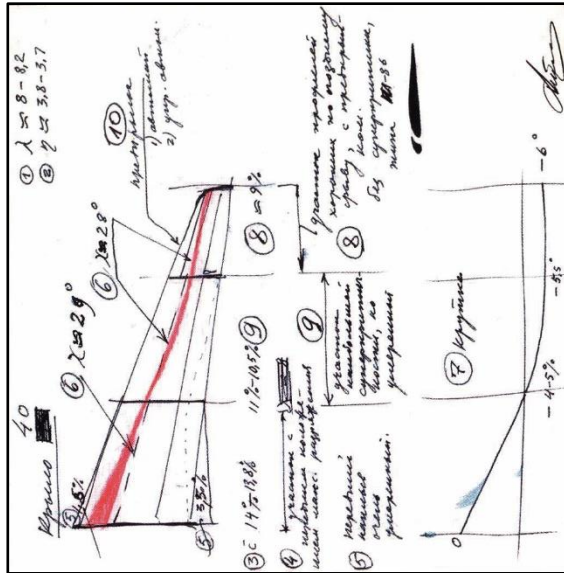


Рис. 4.2. Ідея та рекомендації О. К. Антонова під час розроблення аеродинамічного компонування крила Ан-124 [43].

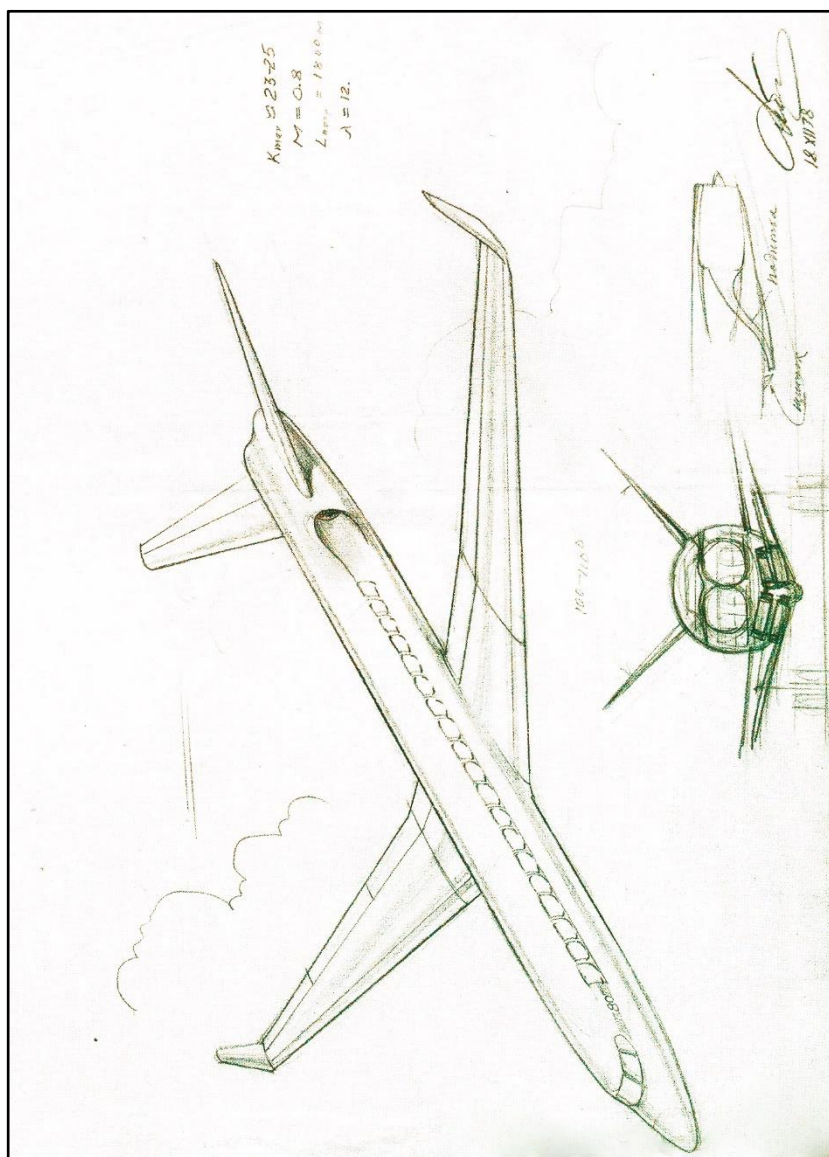


Рис. 4.4. Архівні матеріали АНТК «Антонов», що свідчать про унікальну організацію робіт та участь у них Генерального конструктора під час створення літака Ан-124 «Руслан» [43].

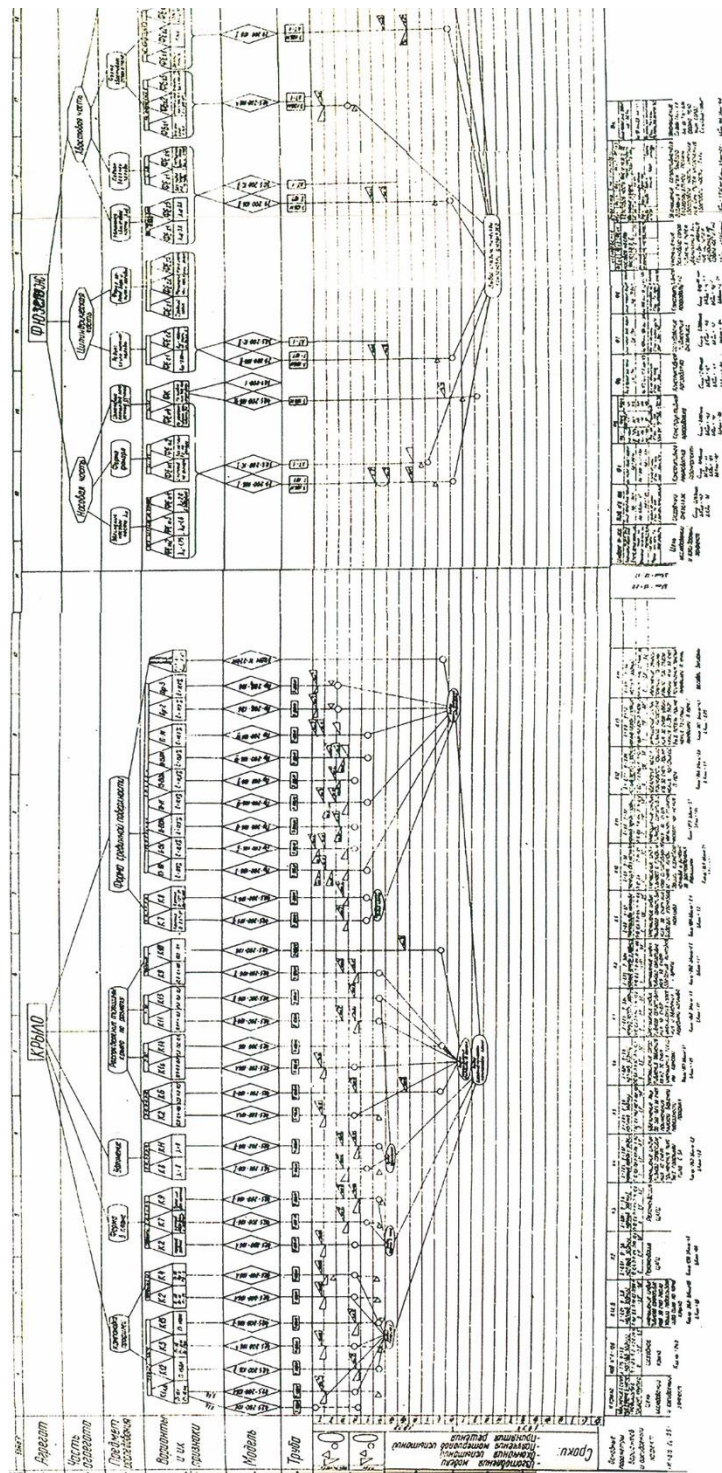


Рис. 4.5. Фрагмент программы №1 экспериментальных исследований аэродинамического компонента планера літака Ан-124 у крейсерській конфігурації (фюзеляж) [43].

До категорії компонентів, які мають виконувати критичні функції, найчастіше відносяться динамічні елементи, котрі містять матеріали, що працюють на критичних навантаженнях, особливо тривалий час. Окремої уваги вимагають компоненти, у яких використані новостворені матеріали, зокрема композиційні. Незважаючи на витрати, системи та підсистеми, що містять такі компоненти, доводиться додатково випробовувати, у тому числі і в натуральну величину.

Під час аналізу функціонування також слід звертати увагу на взаємодії помірно-складних компонентів, через різні інтерфейси із іншими компонентами системи. Необхідно брати до уваги ту властивість інтерфейсів, що їх кількість може кратно збільшити ризики невизначеності поведінки компонента системи і, можливо, системи в цілому.

Приклад. Відома з історії трагедія – аварія пасажирського літака Ан-10 під м. Харковом у 1972 році, причиною якої стало руйнування крила у місці базового сполучення із центропланом. Це так званий «механічний інтерфейс». Крило було розраховане правильно, центроплан теж, але наявність з'єднання заклало свою специфіку у картину навантаження і розподілу навантажень, утворення концентраторів напружень в зоні отворів елемента крила із високоміцного алюмінієвого сплаву, що не було вчасно враховано і не виявлено в процесі експлуатації. Після цієї катастрофи весь парк літаків був перевірений, на багатьох літаках був виявлений аналогічний дефект - зароджувані тріщини, які йдуть від отворів. Весь парк літаків було знято з експлуатації та згодом утилізовано.

Зоною відповідальності системного інженера є, серед іншого, контроль інтерфейсів у системі. Наявність складних інтерфейсів, надмірна, недостатньо виправдана їх кількість – ознака недосконалості системи, її неефективного функціонування у майбутньому.

У тому випадку, коли габарити, швидкості руху, динамічні характеристики, застосовувані матеріали та багато іншого у новоствореній системі сильно відрізнятиметься від попереднього прототипу – можуть проявитися нові закономірності взаємодії цієї системи із навколишнім середовищем. Це вимагає обліку, аналізу та, як правило, експериментальної перевірки на зразках чи моделях, прототипах компонентів системи, часом на дослідних виробах – на системі.

На етапі ескізного проектування, окрім виявлення елементів системи, які вимагають спеціальної розробки, має бути передбачено завершення функціонального проектування та комплексування всіх функціональних елементів системи загалом. Це дозволяє формалізувати вже прийняті рішення, документувати їх і перейти на наступному етапі до технічного проектування системи.

• Розроблення ескізного проекту

Основною метою тут є визначення всіх компонентів та підсистем майбутньої системи, організація розроблення заново застосовуваних із них, а також конфігурація системи загалом. Потім організація випробування та валідації, звертаючи особливу увагу на характер взаємодії новостворених компонентів із іншими елементами системи.

Існує певний набір практик, які дозволяють виявляти та фокусувати увагу системних інженерів та інших розробників системи та її компонентів на потенційно проблемних сферах майбутньої системи, що потребують моделювання поведінки, можливо розроблення прототипів.

Так, наприклад, слід пропустити через «критичне сито» всі проєктні пропозиції, для яких відсутні або невідомі приклади, прецеденти їхньої успішної реалізації, якщо немає достатніх та достовірних даних поведінки компонентів за найважливішими прогнозами [6].

Для таких компонентів рекомендується проєктні рішення розглянути під кутом зору наступних питань:

- Чи може нештатна ситуація із компонентом призвести до відмови всієї системи?
- Якою є картина розвитку катастрофічної ситуації?
- Яким чином розробник може усунути можливу відмову компонента та всієї системи?

Зауважимо, що пошук потенційних проблем не варто обмежувати лише роботами стадії розробки ескізного проєкту. Слід розглядати весь життєвий цикл системи: від розроблення до експлуатації, технічного обслуговування та звертати увагу на подальшу утилізацію. Рекомендується вже під час розроблення ескізного проєкту ретельно досліджувати питання надійності, безпеки експлуатації, ремонтпридатності та технологічності конструкцій системи, не відкладати цю роботу на етап технічного проєктування. Ефективним шляхом, що дозволяє досягти необхідного ефекту, є використання так званого методу «паралельної інженерії». Він передбачає широке та системне залучення профільних, вузькоспеціалізованих фахівців для консультацій із цих ранніх кроків матеріалізації системи.

На практиці це забезпечується закріпленням таких фахівців (матеріалознавців, технологів, хіміків) за проєктними підрозділами, аби врахувати їх досвід в ході прийняття проєктних рішень. Так, наприклад, інженери-матеріалознавці та

технологи під час проєктування нових систем тимчасово включаються до складу відділів та підрозділів, що розробляють ескізні рішення для найбільш складних компонентів системи.

Під час розроблення ескізного проєкту має бути забезпечена тісна, творча та ефективна взаємодія між системним інженером, який за визначенням має володіти кількома суміжними інженерними спеціалізаціями, бути комунікабельним лідером команди, та вузькопрофільними фахівцями. Також, має бути створена система постійних консультативних комунікацій, яка передбачає можливість активного запрошення та залучення до проєктних завдань найкваліфікованіших спеціалістів у своїх сферах діяльності, у тому числі із зовнішнього, за відношенням до команди проєкту, середовища.

Все це, крім іншого, дозволяє виявити та визначити об'єкти майбутньої системи, її компоненти, які потребують розроблення прототипу та проведення випробувань. При цьому слід мати на увазі, що коли основною проблемою, яку потрібно виявити, є якість функціонування будь-якого компонента, тоді може виявитися достатнім проведення порівняльного моделювання, яке дозволить визначити найкращий підхід з точки зору функціональних потреб. У тому випадку, коли йдеться про визначення фізичних характеристик компонента системи, тоді, як правило, доцільним стає проєктування та виготовлення прототипу або дослідного зразка, щоб потім випробувати його в умовах, близьких до реальних.

• Випробування

Завершальними діями етапу ескізного проєктування є проведення випробувань прототипів або дослідних зразків

компонентів майбутньої системи, метою яких є отримання підтверджуючих даних про те, що всі проблеми, виявлені під час цього етапу успішно вирішені.

Слід відрізнити випробування, які проводяться на цьому етапі, від інших видів підтверджуючих та валідаційних випробувань «доводочних», «натурних» та інших¹⁸.

Часто цей вид випробувань називають «стендовими випробуваннями». Їм піддаються підсистеми, прототипи чи дослідні зразки компонентів та його ключові субкомпоненти. Випробування плануються, організуються та проводяться розробником системи.

В ході організації випробувань зазвичай передбачаються такі дії [6]:

- розроблення методик, програм випробувань та аналіз їх результатів;
- розроблення, виготовлення, закупівля випробувального устаткування;
- проведення власне стендових випробувань;
- аналіз, оцінка результатів випробувань.

За наслідками першого етапу передбачають корекцію проєктних рішень. Далі, за необхідності, можливе доопрацювання зразків, умов випробувань та повторення випробувань.

На етапі ескізного проєктування, коли виявлені основні значущі чи критичні для функціонування системи компоненти, виготовляються їхні прототипи та дослідні зразки. Важливою

¹⁸ ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения» [71] та його український аналог ДСТУ 3021-95 «Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення» [72].

функцією системного інженера є визначення пріоритетів у проведенні випробувань, затвердження графіків використання стендів та випробувального устаткування з метою максимально ефективного використання часу та інших ресурсів. Очевидно, що для розробників системи ідеальним було б проведення всеосяжних випробувань якомога більшої кількості компонентів у середовищі функціонування. Це потребувало б створити повномасштабний прототип усієї системи у відповідному середовищі оточення. Останнє виявляється дуже витратним, як із погляду часу, так і інших ресурсів. Іншою крайністю була би можливість імітувати фізичне функціонування окремого компонента системи разом із найпростішими імітаційними моделями елементів, із якими він вступає у взаємодію.

Насправді часто використовується компромісна «середня» позиція, коли випробовуваний компонент включається до прототипу підсистеми, а решта системи та її оточення імітуються.

Приклад. Ілюстрацією такого підходу є випробування лопатки компресора газотурбінного двигуна на реакцію після потрапляння до неї птиці. Ці випробування проводяться на спеціальному стенді, де закріплений реальний двигун із компресором та лопатками зі спеціального матеріалу. Двигун працює в штатному режимі, постріл тушкою птиці із заздалегідь розрахованою швидкістю імітує попадання реального птаха у двигун в реальних умовах експлуатації. Далі, оцінюється поведінка двигуна, як підсистеми – час його роботи після події, поведінки загалом лише на рівні підсистеми, окремо – стан лопаток, вид їх руйнації, форма, тип руйнації, оцінка впливу їх руйнації на функціонування підсистеми загалом.

4.2 Етап технічного проєктування

Метою даного етапу є формування комплекту документації, який містить не лише раніше використовувані в попередніх системах, але і заново спроектовані компоненти і деталі, що інтегруються до системи. Ця система повинна задовольняти всі вимоги надійності та безпеки функціонування, технологічності конструкцій системи, ремонтпридатності та подальшої утилізації. У результаті проєктні рішення знаходять фізичне втілення у формі апаратних та програмних елементів. Крім цього, виходами етапу є детальні плани випробувань нових компонентів та результати їхньої оцінки. Має бути актуалізована документація, що містить плани управління програмою створення системи, у тому числі ієрархічна структура робіт, інші допоміжні плани та графіки виконання робіт.

Цьому етапу, як зазначалося раніше, передуює етап ескізного проєктування, а за ним слідує етап інтеграції та атестації системи в цілому (рис. 4.6).

Необхідно звернути увагу на те, що на початку етапу **технічного проєктування** знання та уявлення про поведінку компонентів, запозичених із попередніх систем та компонентів, заново застосовуваних в системі, можуть сильно відрізнятися. На цьому етапі належить отримати якомога більш точну інформацію про поведінку нових компонентів. Для цього планується і здійснюється виготовлення багатьох випробувальних стендів, повним ходом проводяться випробування зразків, деталей, компонентів. Усе це реалізується не послідовно, а зазвичай, паралельно: у міру готовності технічної документації на ті чи інші компоненти; у

міру готовності до роботи випробувальних стендів; у міру готовності постачальників поставити ті чи інші деталі, компоненти чи випробувальне устаткування. Але до кінця етапу технічного проєктування, за рахунок проведення всебічних випробувань, валідації, знання щодо поведінки нових компонентів мають бути еквівалентними знанням про компоненти, запозичені із попередніх систем.

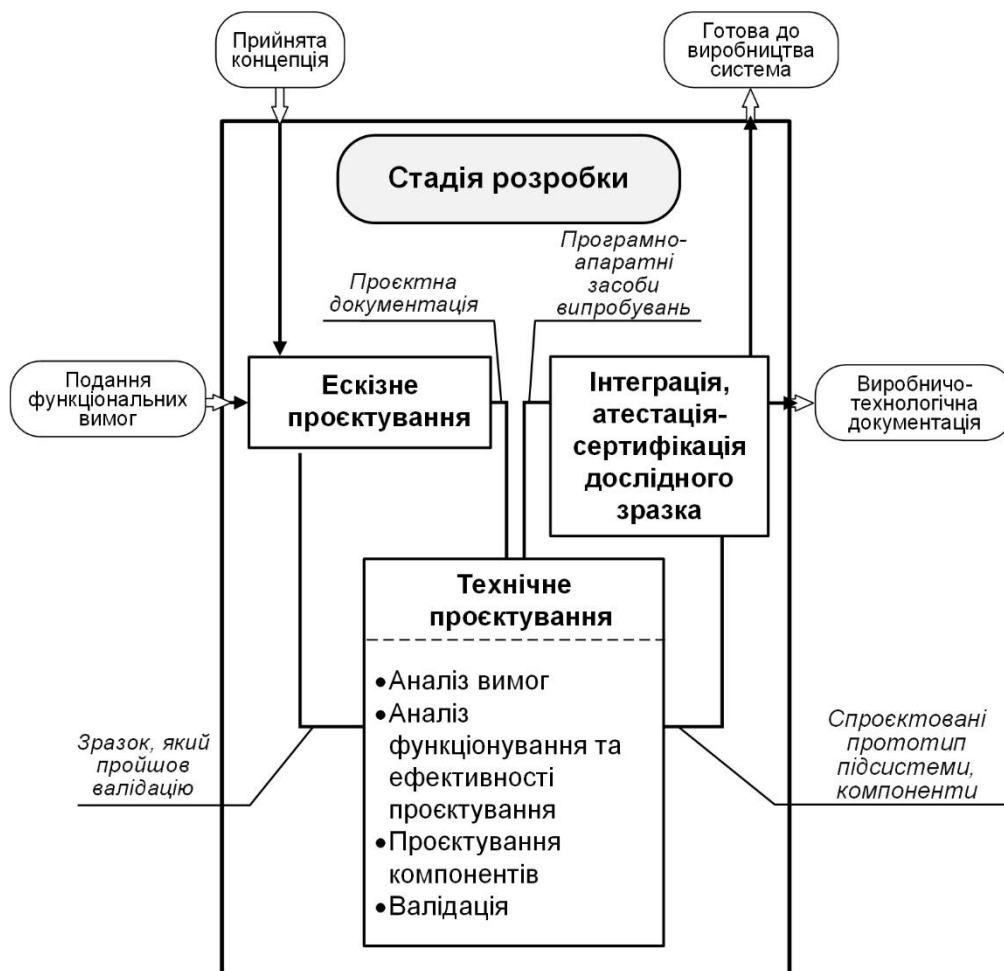


Рис. 4.6. Стадія розробки: етап технічного проєктування.

Слід окремо відзначити, що у вітчизняній практиці у галузі цивільної техніки термін «Технічне проєктування системи» не використовується. Близькими за змістом є роботи стадії «Технічний проєкт» та «Робоча конструкторська документація дослідного зразка виробу» (табл. 2.7 – ДСТУ 3974-2000 [58]). У вітчизняній нормативній документації у галузі військової техніки подібні до змісту роботи також виконуються на 2-ій та 3-ій стадіях життєвого циклу виробу військової техніки: розділи «Розроблення» та «Виробництво» (табл. 2.5 – ДСТУ В-П 15.004: 2019 [41]).

Забігаючи вперед, але для кращого розуміння ситуації, ще раз зазначимо, що послідовність робіт, що включаються до етапів життєвого циклу, дуже умовна. Насправді постійно мають місце «ітераційні петлі», перекриття робіт різних складних етапів. Причому це все більш явно має місце по ходу розвитку та матеріалізації системи. Так, наприклад, під час етапу **технічного проєктування** вже починають у все більшому обсязі реалізовуватися роботи наступного етапу - інтеграція, атестація-сертифікація дослідного зразка.

Оскільки етап інтеграції завершується роботами з атестації системи, то результатом мають бути випробування дослідного зразка системи – у цивільному авіабудуванні це етап отримання та реєстрації «сертифікату типу» на той чи інший тип літака. З цього випливає, що паралельно виконуються і перекриваються не лише роботи у межах однієї стадії, наприклад, «Стадії розробки системи», але й перекриваються роботи різних стадій. Так, на «Стадії розробки системи» – етапі технічного проєктування починають виконуватися, як окремі випереджувальні роботи, що відносяться до етапу інтеграції та

атестації, так і роботи «Стадії построзробки системи» – етапу «виробництва системи», на якому в міру готовності конструкторсько-технологічної документації можуть розпочатися роботи з підготовки системи до серійного виробництва (рис. 4.7).

Зазначимо окремо, що фізично роботи із будівництва дослідного зразка виконуються виробничим персоналом на виробничому устаткуванні та із використанням реальних матеріальних та фінансових ресурсів. Але оскільки дослідний зразок-демонстратор є за логікою системного підходу - зразком, який підлягає валідації розробленої системи, тому прийнято всі витрати на його виготовлення відносити на статтю «розробка системи».

У складі етапу технічного проєктування прийнято виділяти чотири основні дії:

- Аналіз вимог.
- Аналіз функціонування та ефективності проєктування.
- Проєктування компонентів.
- Валідація.

● Аналіз вимог

Нагадаємо, що аналіз вимог виконувався ітераційно на всіх попередніх етапах. Остання актуалізація вимог була проведена на етапі ескізного проєктування, коли функціональні вимоги до системи, актуальні на той момент, були формалізовані в набір технічних вимог, що дозволило вибрати конкретний підхід до проєктування та провести його валідацію з позицій забезпечення вимог до функціонування. На даному етапі ще раз проводиться перевірка вимог до функціонування.

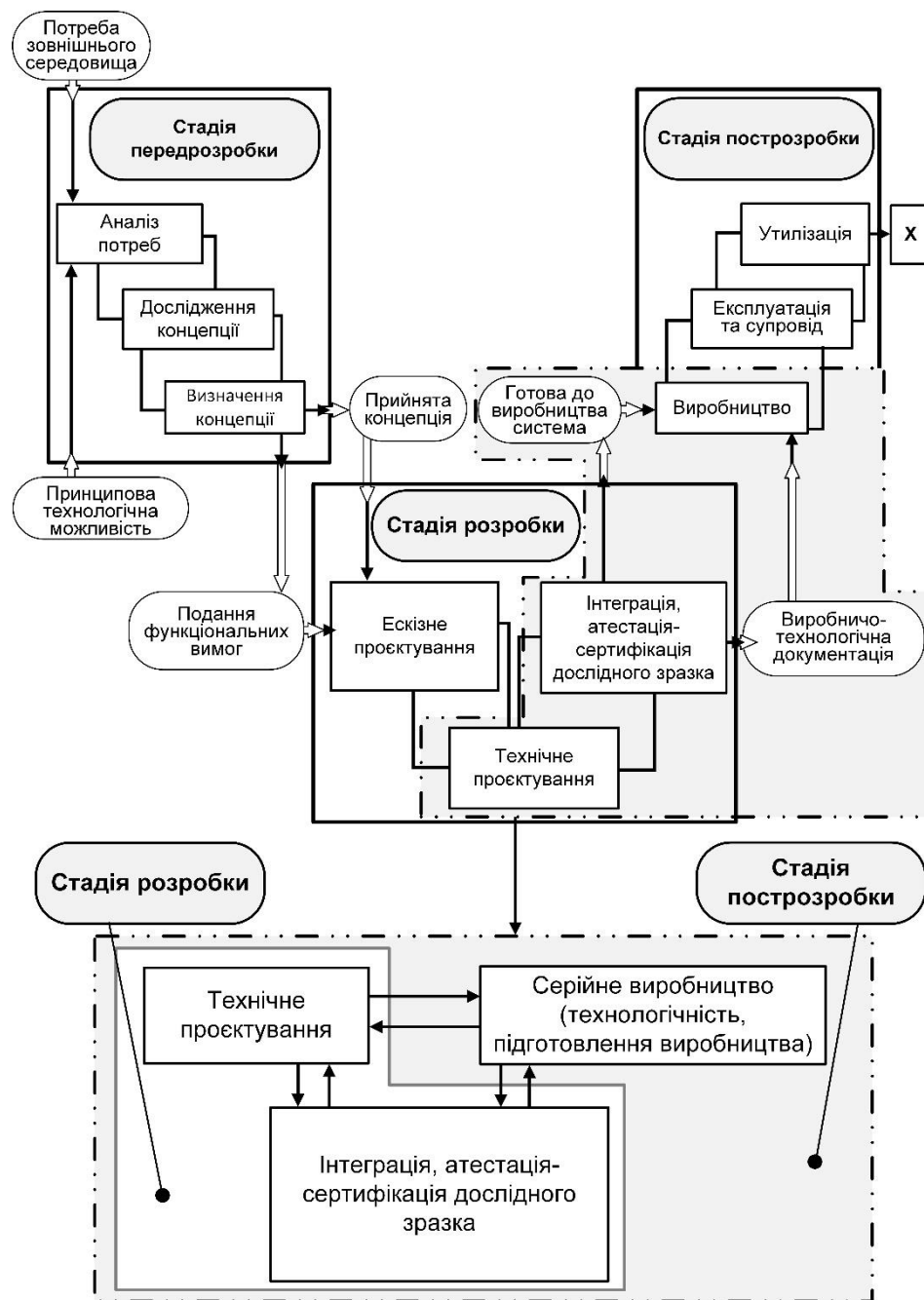


Рис. 4.7. Зв'язки та перекриття робіт стадій та етапів: технічного проєктування та інтеграції, атестація-сертифікація дослідного зразка.

Майже завжди, у міру розроблення технічної документації, надходять будь-які нові «вступні», як щодо компонентів, що вимагають нового розроблення, так і поведінки раніше використовуваних у попередніх системах компонентів. Щодо новостворених компонентів це, найчастіше, не підтвердження або неповне підтвердження очікуваних результатів за підсумками проведених випробувань. Стосовно раніше використовуваних компонентів — це нові дані, пов'язані із прогресом їх характеристик, що надходять від постачальників. Усе це має бути враховано під час розроблення технічної документації.

Ще раз, особлива увага має бути приділена зовнішнім та внутрішнім інтерфейсам системи. Оскільки до цього етапу система фізично не складалася, слід особливо ретельно досліджувати параметри сполучення системи із зовнішнім середовищем, інфраструктурою, її габаритними характеристиками, логістику та інші значущі атрибути.

Приклад. Щоб забезпечити складання літака Ан-124 «Руслан» довелося на цьому ранньому етапі технічного проєктування системи, **«проєктувати навколишню систему»** – спеціальне виробництво із унікальними за розмірами прольотами та силовими елементами, що витримують необхідне силове навантаження.

На цьому етапі мають розроблятися інтерфейси сполучення системи із користувачами – пілотами, операторами, обслуговуючим персоналом. Має бути вже створено експериментальні натурні імітатори людино-машинних інтерфейсів. Саме на цьому етапі окрему увагу приділяють інтерфейсам користувача, що відносяться до обслуговування системи в експлуатації, для ремонту, модернізації. Розробляють базові підходи та мережі логістики підтримки системи в

експлуатації. Якщо ці роботи відкласти на наступні етапи, то, як показує практика, доведеться вносити зміни до вже розробленої документації, а це може призвести до великих часових і фінансових витрат.

• Аналіз функціонування та ефективності проектування

Головною метою аналізу функціонування на даному етапі прийнято вважати оцінку забезпечення максимально можливої незалежності компонентів між собою та із системою в цілому для того, аби полегшити агрегування, модульність і таким чином полегшити обслуговування та можливу модернізацію.

Сучасним підходом є максимізація модульності конструкції. Це, можливо, робить її більш дорогою, але протягом життєвого циклу витрати зазвичай окупаються.

В ході виконанні функціонального аналізу на етапі технічного проектування, як уже зазначалося, перевіряються чи визначені межі між компонентами, підсистемами так, щоб їх взаємодія між собою була мінімізована.

Сенс цього полягає в наступному [6]:

- модульний компонент може бути специфікований, розроблений, виготовлений та замовлений як автономний блок;
- модульні компоненти не потребують додаткових налаштувань під час інтеграції;
- модульний компонент легко замінити під час ремонту, його можна модернізувати без впливу на інші компоненти.

Приклад. Грамотно спроектованою підсистемою є крила цивільних літаків А-320, що привозяться в готовому, перевіреному, сертифікованому та запакованому вигляді з Великобританії до Франції в м. Тулузу, де здійснюється їх стикування з фюзеляжем.

Під час аналізу функціонування та оцінювання ступеня модульності компонентів рекомендується використовувати наступні три критерії (табл. 4.2) [6].

Таблиця 4.2. Типові критерії, що використовуються для оцінки ступеня модульності компонентів у системі.

Критерій	Характеристики критерію	Приклад модульного компонента
Значущість	Виконання складної, специфічної функції, що включає підфункції	Механізм сервоприводу механізації крила
Специфічність	Реалізація функції у межах певної інженерної спеціалізації	Використовується в системах механізації крила літака
Уніфікованість	Виконувана функція використовується у низці систем і механізмів	Використовується в обох крилах та у низці агрегатів систем механізації

Таким чином, на даному етапі аналізується та перевіряється наскільки вдалося під час проектування уникнути різноплановості у використанні компонентів і якою мірою забезпечено вимогу максимально можливої модульності та уніфікованості компонентів системи.

• Проектування компонентів

До цього етапу, зазвичай, ще залишається значна частина компонентів, за якими не прийнято остаточні проєктні рішення. На етапі технічного проектування належить визначитися із

такими компонентами, вибрати відповідні проєктні рішення, документувати їх, виготовити та випробувати компоненти, щоб бути готовими на наступному етапі інтегрувати їх у систему з тим, аби на етапі інтеграції був складений та випробуваний дослідний зразок та проведено його атестацію і сертифікацію.

В ході проєктування складних інженерних систем в оборонних галузях промисловості за кордоном етап технічного проєктування прийнято розділяти на два підетапи: попереднє та детальне проєктування. Кожен із підетапів закінчується офіційним висновком – рецензуванням проєкту замовником. У разі позитивного висновку приймається рішення щодо переходу проєкту на наступний підетап або етап. У менш формалізованому вигляді ця методологія використовується для розроблення будь-яких складних інженерних систем.

У якості експертів–рецензентів у таких випадках виступають найбільш авторитетні фахівці організації розробника, можливо, запрошені визнані спеціалісти із відповідних галузей діяльності.

Якщо система створюється у межах державних програм, тоді, наприклад, в США попередній аналіз проєктних рішень (Preliminary Design Review – PDR) здійснює спеціалізоване агентство із придбання, яке й оформляє висновок, який фіксує факт завершення попереднього проєктування. Цьому передую власний аналіз та рецензування етапу *попереднього проєктування*. Завершальним кроком попереднього проєктування є **затвердження вихідної конфігурації системи**. Результатами попереднього проєктування є технічні специфікації, директивні технологічні матеріали, що регламентують межі застосування технологічних процесів,

результати дослідження компромісів, макети, моделі, лабораторні зразки, звіти за результатами проведених випробувань та досліджень. До них відносяться, крім іншого, високорівневі проєкти із функціонування системи, дослідження в галузі спеціальної інженерії – надійності, ремонтпридатності, технологічності, виконання логістичних вимог та ряд інших технічних матеріалів, які є специфічними для різних сфер діяльності.

Детальне проєктування основною метою ставить всеосяжний повний опис всіх елементів, що становлять систему. Повний комплект документів складається із планів, специфікацій, графіків, конструкторсько-технологічної документації, тобто документів, які дозволяють ухвалити рішення щодо початку серійного виробництва системи.

До результатів детального проєктування відносять: комплекти технічних умов на матеріали, напівфабрикати, куповані вироби, на агрегати, що поставляються по кооперації; детальні технічні кресленики підсистем, зокрема на цифрових носіях; протоколи апаратного забезпечення та відповідне устаткування; різноманітні плани управління конфігурацією, контролю якості, логістичного забезпечення та низку інших документів.

На цих етапах роль системного інженера дуже суттєва, а то й визначальна. Саме на цих етапах доводиться приймати велику кількість рішень, від яких залежить рух системи за циклом свого створення. На цих етапах виявляються раніше недостатньо опрацьовані внутрішні та зовнішні інтерфейси. Доводиться окремо тримати у фокусі завдання виготовлення дослідного зразка системи, причому часто із тимчасовими вимушеними

замінами окремих компонентів і деталей, проте, зі збереженням повної імітаційної подібності із майбутнім серійним компонентом.

Для того, щоб приймати виважені та ефективні рішення системний інженер має достатньо володіти питаннями автоматизованого проєктування та виробництва, знати особливості різних конструкторських, виробничих, автоматизованих систем, вимоги до їх інтерфейсів.

• Валідація

Як розглядалося у попередніх розділах, процесами та діями щодо валідації проєктних рішень завершуються всі стадії розробки системи життєвого циклу системи.

У ході реалізації етапу технічного проєктування фокусуються в основному на валідації компонентів, які входять до складу створюваної системи. Слід особливо відзначити, що хоча процеси валідації хронологічно розташовані в завершальній частині етапу, насправді процеси планування валідації починаються на ранніх стадіях етапу технічного проєктування. Валідація проєктних рішень, у певному сенсі – безперервний процес, який починається із етапу ескізного проєктування і весь час, у міру готовності конструкторсько-технологічної документації, продовжується безперервно, переходячи в більш пізні етапи або навіть стадії. Згадаємо один із багатьох прикладів із практики авіабудування.

Приклад. Літак Ан-26 перебував в експлуатації вже понад десяток років. У конструкції літака з метою зменшення абразивного зношування окремих низько розташованих елементів фюзеляжу, вперше у вітчизняній практиці був застосований шаруватий композиційний матеріал – біметал: листи зі сплавів титану та алюмінію. Корозійні стендові випробування, що

підтверджують ефективність цього рішення, тривали понад 15 років від початку серійного виробництва та масової експлуатації літаків Ан-26.

Необхідність раннього планування випробувань пояснюється лише тим, що установки, стенди, устаткування проведення випробувань часто доводиться закуповувати, орендувати, проєктувати, виготовляти, навчати персонал. Все це вимагає часу та значних витрат. Планування та власне проведення випробувань часто вимагає залучення профільних фахівців, що працюють у різних організаціях.

Роль системних інженерів під час планування та в організації випробувань полягає в моніторингу процесів досліджень та випробувань компонентів, які є потенційними джерелами ризиків, та у виробленні заходів щодо усунення таких ризиків або їх пом'якшення.

Ще одна важлива функція системного інженера реалізується в процесі координації та контролю за виготовленням компонентів системи, що підлягають валідації.

Процес валідації на етапі технічного проєктування полягає, в тому числі, у тому, щоб визначити, наскільки спроектований компонент має задані характеристики і як інтегрується із іншими компонентами, підсистемами системи. Для цього, звичайно, компонент має бути виготовлений фізично. Як свідчить практика, майже завжди або дуже часто технологічний процес виготовлення компонента системи для здійснення валідації буде відрізнятися від серійного технологічного процесу. У першому випадку компонент виготовлятиметься на універсальному устаткуванні, складання – інтеграція здійснюватиметься найчастіше вручну або за допомогою найпростіших інструментів. У серійному виробництві, наприклад, формоутворення різанням здійснюється на

високоавтоматизованому устаткуванні, складання – інтеграція системи також проводиться переважно у автоматизованому режимі. Крім того, під час виготовлення компонентів для валідації використовуються найпростіші заготовки: прутки, поковки, плити. У серійному виробництві виготовлення деталей здійснюється із профільованих точних заготовок – штампувань, виливків, пресованих та гнутих профілів, деталей, отриманих пошаровим синтезом.

Таким чином, не доводиться очікувати точного відтворення властивостей і характеристик компонента, виготовленого для валідації на цьому етапі та виготовленого серійно. У всіх цих випадках потрібна робота інженерів різних профілів діяльності: металофізиків, матеріалознавців, металургів, технологів та інших спеціалізацій. Дати вичерпну відповідь, прийняти остаточне рішення щодо ступеня відповідності імітаційної фізичної моделі, отриманої в дослідному виробництві, реальній ситуації в майбутньому серійному виробництві належить системному інженеру.

Навіть у тих випадках, коли компонент використовується в системі «за прецедентом» – із раніше застосовуваних у близьких за типом системах, все одно потрібна валідація, оскільки розробник і виробник компонента, підсистеми, модуля за час, минулий від попереднього застосування, майже завжди вдосконалює компонент – «розвиває» його: змінює деякі деталі, використовує для їх виробництва ефективніші матеріали та технологічні процеси. Крім цього, застосування компонента в попередній системі майже завжди чимось відрізнятиметься від використання в розроблюваній системі. У всіх ключових питаннях стосовно коректності програми валідації,

обґрунтованості прийняття тих чи інших припущень вирішальна роль відводиться системному інженеру.

Як зазначалося раніше, завдання стендових випробувань відрізняється від звичних, приймально-здавальних випробувань, використовуваних усіма сучасними виробництвами. Основним завданням стендових валідаційних випробувань є не лише необхідність встановлення факту того чи іншого відхилення від заданих характеристик, але й встановлення їх кількісних параметрів, діагностування їхнього джерела, щоб можна було зробити відповідні корективи до проектних рішень.

Всі процеси поведінки компонентів у системі фізично змодельовати та зімітувати складно, дорого, довго і тому неефективно. Під час планування стендових випробувань слід сфокусуватися на тих компонентах і зовнішніх впливах, які можуть виявитися критичними для життєдіяльності і життєзабезпечення компонента і системи. Багато завдань стендових випробувань впливають із вимог національних чи міжнародних регламентів у тих чи інших сферах діяльності. Це можуть бути затверджені екологічні норми, вимоги безпеки та виживання операторів, норми безпечного руйнування конструкції. Все це і багато іншого слід змодельовати, випробувати та валідувати.

Наприклад, складні стенди випробувань проєктуються та виготовляються для дослідження міцнісних характеристик основних підсистем та компонентів літака (рис. 4.8). Дуже трудомісткими у виготовленні є стенди натурних випробувань літака на статичну та втомну міцність, а також випробування на надлишковий тиск у гідробасейні. Ці дослідження дозволяють

спрогнозувати поведінку фюзеляжу за умов впливу навантажень від крила, оперення, двигунів, шасі. Для стендових випробувань літака Ан-124 «Руслан» в АНТК «Антонов» була побудована найбільша й найсучасніша (на той період – 1988 р.) лабораторія випробувань міцності в Європі.

У створенні випробувального устаткування брали участь понад півтора десятки груп фахівців найрізноманітніших професій.

З наведених прикладів випливає, що для складних інженерних, наприклад, авіаційних систем, що володіють великим обсягом інноваційних рішень, планування, розроблення випробувального устаткування, його виготовлення і процес випробувань, самі по собі є інноваційним продуктом.

Чим складнішою є випробувана система, підсистема, компонент, тим складніше випробуване устаткування і тим затратніші випробування. Для зниження витрат на дослідження розробники системи дедалі ширше, особливо в останні десятиліття, стали використовувати консолідовані випробувальні центри, що спеціалізуються на окремих типах та видах випробувань. Ними розробляються унікальні методики та вдосконалюється інструментарій.

Приклад. На рисунку 4.9 наведений фрагмент випробувального стенда із встановленою секцією фюзеляжу з нанесеним спеціальним покриттям, яка піддається навантаженням надлишковим тиском. Спеціальне інноваційне покриття за допомогою приладів дозволяє фіксувати інтерференційну картину, що відображає розподіл напруженого деформованого стану в елементах секції фюзеляжу. Подібні випробування проводить спеціалізована в цій галузі – компанія IMA Dresden, Німеччина – субпідрядник у частині застосування інноваційного методу вимірювань – Digital Image Correlation (DIC) у процесі статичних та втомних випробувань секції планера.

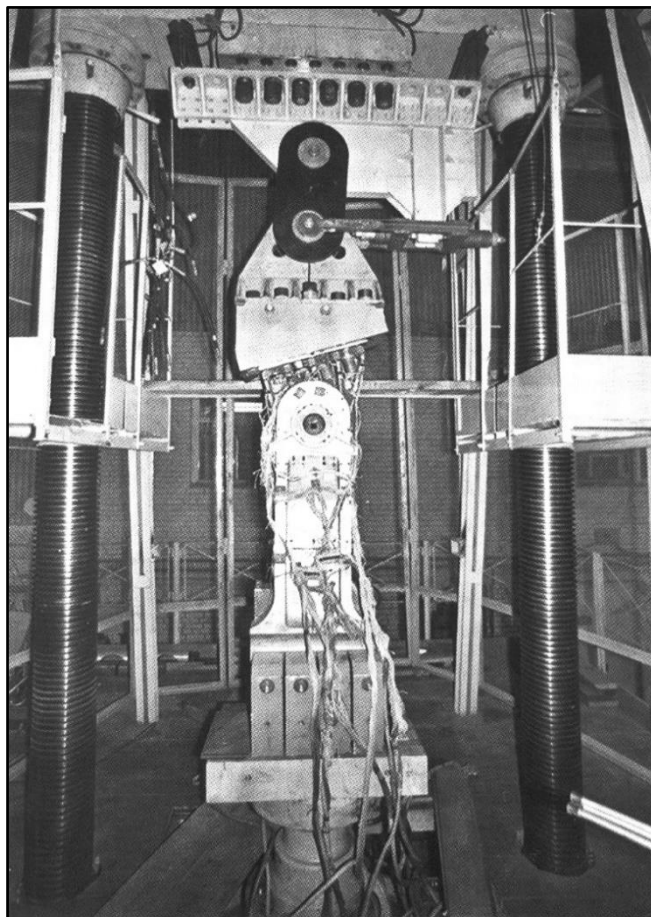


Рис. 4.8. Зразок шарнірного стику літака Ан-124 у випробувальній машині [43].

Очевидно, що випробування складних інженерних систем та їхніх підсистем з метою забезпечення високо професійного рівня досліджень, економії часу та інших ресурсів, мають сенс проводити, диференціюючи роботи між розробником системи та спеціалізованими випробувальними центрами. Якщо дуже узагальнено, то розробник визначає комплекс функціональних параметрів, які вимагають вивчення, розробляє відповідну

модель підсистеми, завдання випробування і характер зовнішніх впливів на неї.



Рис. 4.9. Секція фюзеляжу зі спеціальним покриттям, встановлена у випробувальному стенді [73].

Підрядник-випробувач проєктує, виготовляє стенди, технологічне спорядження, підбирає апаратне, програмне забезпечення для проведення досліджень, організовує та проводить випробування, за необхідності, спільно із розробником системи. Як можливий приклад на рисунку 4.10 наведена загальна схема випробування дослідної панелі фюзеляжу літака.

Параметри навантажень, цикл випробувань, контрольовані параметри задаються розробником системи програми випробувань.

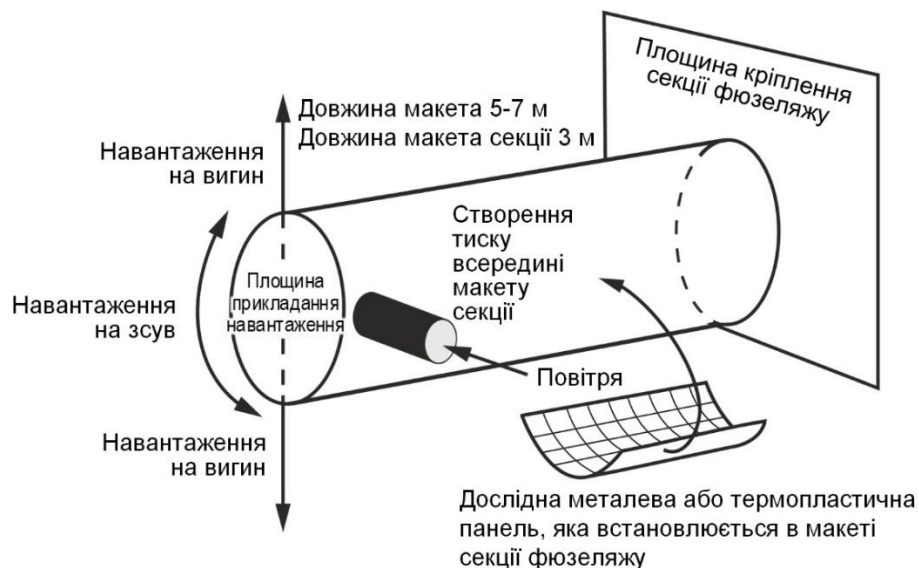


Рис. 4.10. Принципова схема стенду для випробувань панелей фюзеляжу.

Слід звернути увагу на те, що причиною невідповідності заданих характеристик випробуваного компонента отриманим результатам може бути некоректне функціонування самого випробувального устаткування або його інтерфейсів. Тому кожен факт нетипового відхилення результатів випробувань від прогнозних має бути проаналізований системним інженером. У ряді випадків, особливо якщо випробування проводяться в спеціалізованих організаціях або сервісних центрах, має сенс періодично здійснювати моніторинг процесу випробувань.

4.3 Етап інтеграції, атестації–сертифікації дослідного зразка

Основною метою цього етапу є підтвердження того, що раніше обране концептуальне рішення, реалізоване у вигляді інженерно-технологічної документації та у фізичній формі у

вигляді моделі або дослідного зразка¹⁹, дозволяє рекомендувати систему до серійного виробництва та подальшої експлуатації.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- забезпечити інтеграцію – складання всіх компонентів нової системи у єдине ціле, що ефективно функціонує;
- підтвердити, що система в такому вигляді задовольняє заплановані вимоги призначення, принаймні, основні та визначальні вимоги призначення (рис. 4.11).

Примітка. Очевидно, що на даному етапі бажання задоволення всіх вимог призначення є некоректним. Оскільки, багато із заново розроблених і вперше застосовуваних підсистем, компонентів, окремих елементів, як свідчить практика, ще допрацьовуватимуться і вдосконалюватимуться, як у процесі випробувань, так і виробництва, а часом й експлуатації.

Раніше зверталась увага на те, що повсюдне використання випробувань на кожному етапі **стадії розробки системи** на підтвердження правильності обраних проєктних рішень – це одна із найважливіших особливостей методу системної інженерії. На цьому етапі випробування системи грають ключову роль у її життєвому циклі. За результатами цих випробувань буде ухвалюватися рішення щодо подальшого запуску системи у виробництво та експлуатацію. Формально це рішення оформлюється різноманітними документами, встановленими спеціально для кожного виду або типу системи. Саму процедуру ухвалення рішення називають атестацією чи сертифікацією. У авіабудуванні, наприклад, ця процедура називається «сертифікацією типу» конкретного типу літака і знаменується видачою «сертифіката типу».

¹⁹ У вітчизняній практиці для оборонної та військової продукції дослідний (головний) зразок – ДСТУ В-П 15.004:2019 [41].

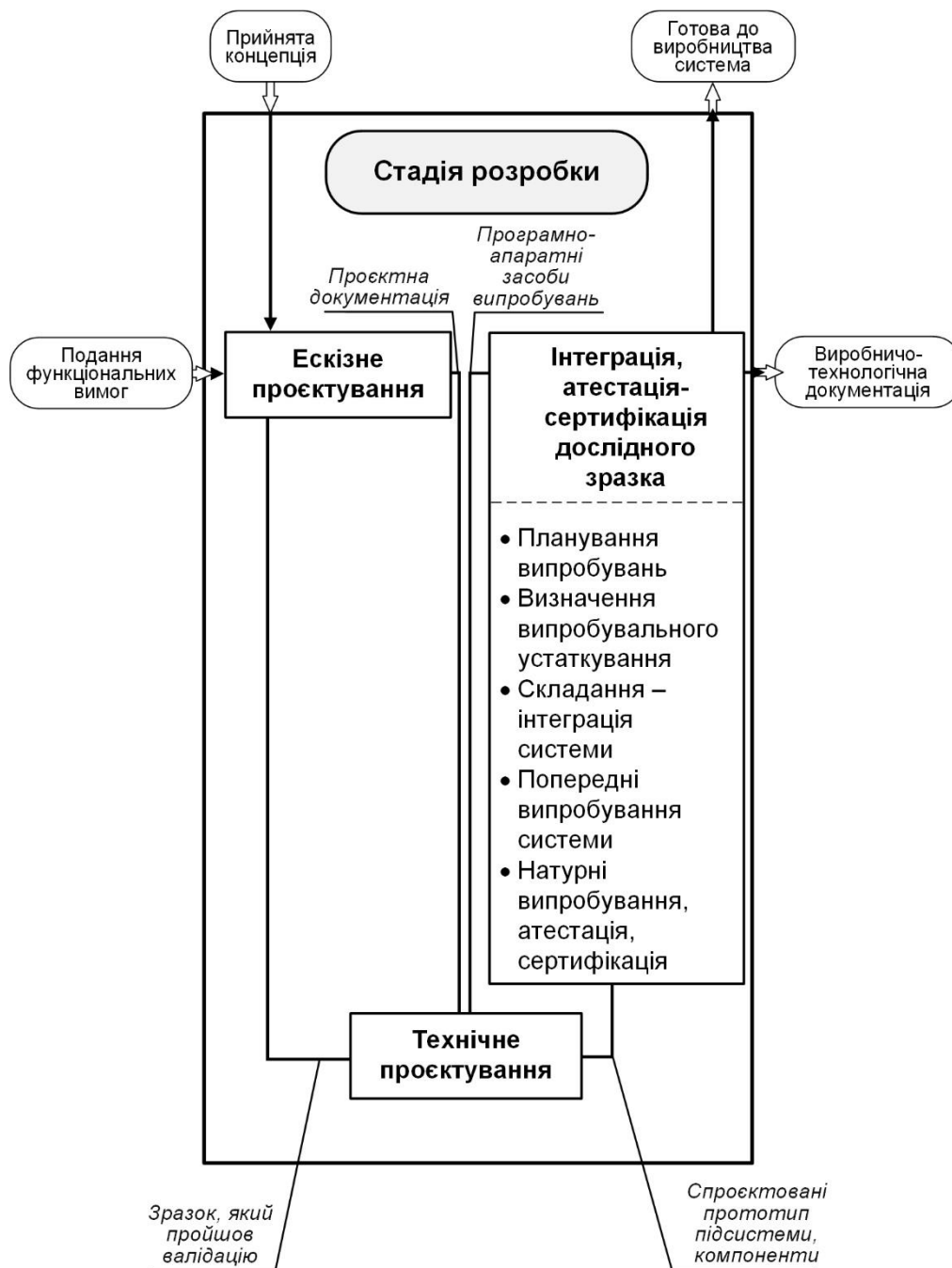


Рис. 4.11. Стадія розробки: етап інтеграції, атестації-сертифікація дослідного зразка.

Очевидно, що на етапі випробування багатьох підсистем, компонентів системи в основному мають бути виконані або близькі до завершення відпрацювання принципових конструкторсько-технологічних рішень. Планування та підготовлення до випробувань системи у складеному – інтегральному вигляді починає виконуватись на попередньому етапі технічного проєктування і продовжується на даному етапі.

На даному етапі інтеграції та атестації фізично імітується працездатність системи у зовнішньому середовищі, а у аналізі її діяльності беруть участь інженери–випробувачі, одна з ролей яких представлятиме інтереси майбутніх користувачів цієї системи. На цій стадії тісно співпрацюють групи фахівців: системні інженери, інженери–проєктанти (конструктори-технологи), інженери–випробувачі. Індивідуальні та комплексні зони відповідальності їхніх дій наведені на видозміненій діаграмі Венна, де окремо виділені найважливіші інформаційні потоки між окремими категоріями груп спеціалістів (рис. 4.12).

Для забезпечення досягнення кінцевої мети етапу атестації складеної – інтегрованої системи, рекомендується наступний порядок дій, які із певним ступенем умовності можна вважати близькими по суті раніше використовуваним на попередніх відповідних етапах розглянутих стадій [6]. Так, перша дія цього етапу - **планування випробувань** співзвучне за змістом із **аналізом вимог** або «входами» в етап. Друга дія – **визначення випробувального устаткування** та умов випробувань близьке за змістом до **аналізу функціонування** чи функціональної реалізації системи. Третя дія – **складання, інтеграція всієї системи** може бути співвіднесено із **синтезом та фізичною**

реалізацією функцій. Четверта дія – випробування та сертифікація, це, по суті, валідація системи.

Слід зазначити, що процеси випробувань, як це згадувалось у попередніх розділах, є невід'ємною складовою життєвого циклу матеріалізації системи. Стендові випробування є прерогативою перших етапів стадії розробки системи (ескізного проєктування та технічного проєктування), але на останньому етапі цієї стадії передбачені випробування інтегрувань системи загалом.

У минулій вітчизняній практиці розроблення нових зразків техніки до стадії розробки прийнято включати дві стадії: «розроблення проєктної конструкторської документації» та «розроблення робочої конструкторської документації» – ГОСТ 2.103-2013 «Єдина система конструкторської документації». Стадії розробки». [74]. У таблиці 4.3 наведено типові вимоги до фізичного підтвердження проєктних рішень у макетах та дослідних зразках, віднесені до різних стадій розробки системи.

У сучасних західних аналогах регламентація випробувань менш жорстка, проте виділяється окремо необхідність проведення «доводочних» і «натурних» випробувань систем ухвалення (прийняття) рішень щодо готовності її до серійного виробництва (табл. 4.4).

У вітчизняному національному стандарті, що стосується систем озброєння та військової техніки, взагалі дуже спрощено регламентується проведення випробувань. Передбачаються попередні та державні (міжвідомчі) випробування, далі передбачено коригування конструкторсько-технологічної документації за результатами цих випробувань та прийняття рішення щодо організації серійного виробництва (табл. 4.5).

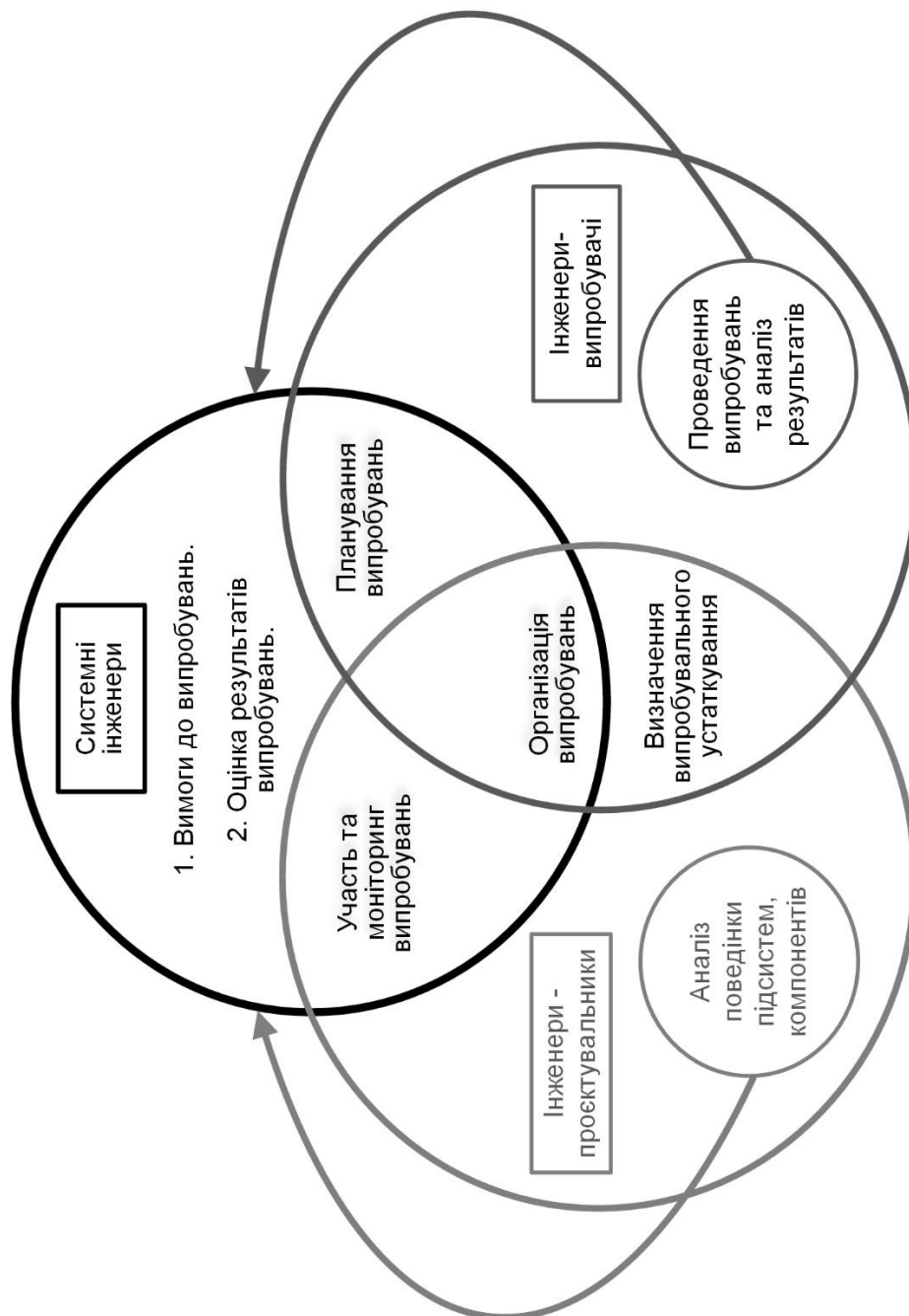


Рис. 4.12. Зони відповідальності учасників випробувань системи.

Таблиця 4.3. Склад випробувань на різних етапах стадії розробки, що рекомендується у минулій вітчизняній практиці – ГОСТ 2.103-2013 [74].

Стадія розробки				
Розробка проєктної конструкторської документації		Розробка робочої конструкторської документації		
Ескізний проєкт	Технічний проєкт	Конструкторсько-технологічна документація для виготовлення дослідного зразка (дослідної партії) виробу	Конструкторсько-технологічна документація на виріб серійного (масового, одиничного) виробництва	
Випробування матеріальних макетів та (або) електронних макетів.	Випробування матеріальних макетів та (або) електронних макетів.	*1. Попередні випробування дослідного зразка (дослідної партії) виробу (без літери).		
		**2. Приймальні випробування дослідного зразка (дослідної партії) виробу.		
		3. За необхідності випробування вибірки зразків виробів з установчої партії (досвідченої партії) (з літерою "O ₁ "). За необхідності, випробування вибірки зразків виробів (з літерою "O ₂ ", ... "O _n ").		
Документації надається літера "Е".	Документації надається літера "Т".	Випробування зразків виробів зі складу настановної серії, виготовленої за документальною літери "O ₁ " (або) "O ₂ ", ... "O _n ".		

* Попередні випробування - контрольні випробування дослідних зразків та (або) дослідної продукції з метою визначення можливості їх пред'явлення на приймальні випробування.

** Приймальні випробування - контрольні випробування дослідних зразків партій продукції або виробів одиничного виробництва, що проводяться з метою вирішення доцільності постановки цієї продукції на виробництво (ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения») [75]).

Табл. 4.4. Рекомендований склад випробувань системи, що здійснюються на стадії її розробки [6].

Стадія розробки		
Ескізний проєкт	Технічний проєкт	Випробування, атестація
Випробування дослідних зразків критичних компонентів та підсистем із метою зниження ризиків та їх невідомої поведінки до прийнятних величин.	Випробування та атестація спроектованих компонентів із перевіркою відповідності функціональним вимогам, оцінка їх інтерфейсів, можливості виробництва. Виправлення виявлених недоліків, урахування цього у проєктній документації.	* Доводочні випробування: - випробування системи загалом, у режимах функціонування; - виявлення відхилень; - усунення відхилень.
		** Натурні випробування: - випробування системи загалом, за умов, тотожних до умов майбутньої експлуатації; - оцінка готовності системи до серійного виробництва та розгортання.

* У вітчизняній практиці: «Доводочними випробуваннями вважаються дослідницькі випробування, що проводяться під час розроблення продукції із метою оцінки впливу внесених до неї змін для досягнення заданих значень показників її якості».

** «Натурні випробування – випробування об'єкта в умовах, що відповідають умовам його використання за прямим призначенням, із безпосереднім оцінюванням або контролем визначених характеристик та властивостей об'єкта».

Таблиця 4.5. Склад випробувань, регламентованих у національному стандарті для систем озброєння та військової техніки – ДСТУ В-П 15.004:2019 [41].

Стадія розробки		
Етап дослідно-конструкторської роботи зі створення (модернізації) виробу озброєння та військової техніки		
Зміст етапу: - ескізний проєкт; - технічний проєкт	Зміст етапу: Технічна документація	Державні (міжвідомчі) випробування
Випробування не регламентуються	Попередні випробування дослідного зразка (дослідної партії). Державні (міжвідомчі) випробування дослідного зразка (дослідної партії).	Проведення державних (міжвідомчих) випробувань дослідного зразка (дослідної партії).

У аналогічному за спрямованістю стандарту РФ корекція документації передбачається, як після попередніх, так і після приймальних випробувань (чітко регламентується присвоєння документації, відповідно, літер «О» і «О₁») (табл. 4.6) [56].

Таблиця 4.6. Склад випробувань, регламентованих у російському стандарті для систем військової техніки – ГОСТ РВ 15.004-2004 [56].

Стадія розробки		
Ескізний проєкт	Технічний проєкт	Випробування, прийняті рішення щодо організації серійного виробництва
Випробування не регламентуються	Попередні випробування дослідного зразка виробу (дослідної партії). Коригування конструкторсько-технологічної документації.	Випробування проводять на стадії технічного проектування. Надання конструкторсько-технологічній документації літери «О». Надання конструкторсько-технологічній документації літери «О ₁ », дозвіл на промислове виробництво.

• Планування випробувань

До цього етапу життєвого циклу, як правило, вже накопичений значний багаж знань щодо поведінки підсистем, компонентів, якості реалізації окремих проєктних рішень. Для авіаційних систем, наприклад, до цього моменту вже мають бути сформовані багато десятків томів, а для унікальних систем сотні звітів стосовно проведених випробувань: аеродинамічних, міцнісних, технологічних, акустичних, електродинамічних та багатьох інших.

На цьому етапі особлива увага приділяється плануванню:

- інтеграції системи;
- організації випробувань;
- власне проведення випробувань.

За всіма цими трьома основними напрямками робіт готуються відповідні плани, які мають бути узагальнені в єдиному документі. Основним результатом його є приймання системи виробництва.

Залежно від типу та особливостей системи, очевидно, що можуть виникнути складні організаційно-технічні проблеми, у тому числі фінансові, комунікаційні, вирішення яких має бути враховано в єдиному плані. Випробування, що проводяться на цьому етапі, зазвичай ділять на два види: доводочні (попередні) і натурні (приймальні). Різниця в термінології буде пояснена нижче у процесі – «Визначення випробувального устаткування».

У ході доводочних випробувань основна увага приділяється питанню реалізації функцій підсистем, компонентів у складі складеної системи. Для авіаційних систем це, наприклад, перевірка літака «під струмом» – оцінка всіх мереж

електрорадіозабезпечення, контроль реагування на керуючі еволюції силових елементів, перевірка реалізації функцій інтерфейсів підсистем та компонентів. І нарешті – «контрольні пробіжки» літака по злітній смузі із відривом переднього стояки, перевірка гальмівних підсистем, гальмування реверсом двигуна, функціонування рулів управління, підсистем механізації крила та багато іншого.

Планування натурних випробувань має певні особливості. Наприклад, для деяких типів систем передбачається спільна програма випробувань та атестації – замовником та розробником, для низки систем замовник воліє проводити випробування самостійно, або із залученням незалежних експертів.

Для складних інженерних систем, зокрема озброєння та військової техніки, часто передбачають кілька повторюваних циклів випробувань. Проведення попередніх випробувань із корекцією за результатами конструкторсько-технологічної документації, виготовлення або доопрацювання системи відповідно до відкоригованої документації та проведення міжвідомчих випробувань із подальшим доопрацюванням конструкторсько-технологічної документації, призначеної для виробничого (масового, серійного або єдиного виробництва – ДСТУ В- П 15.004: 2019 [41]).

- **Визначення випробувального устаткування**

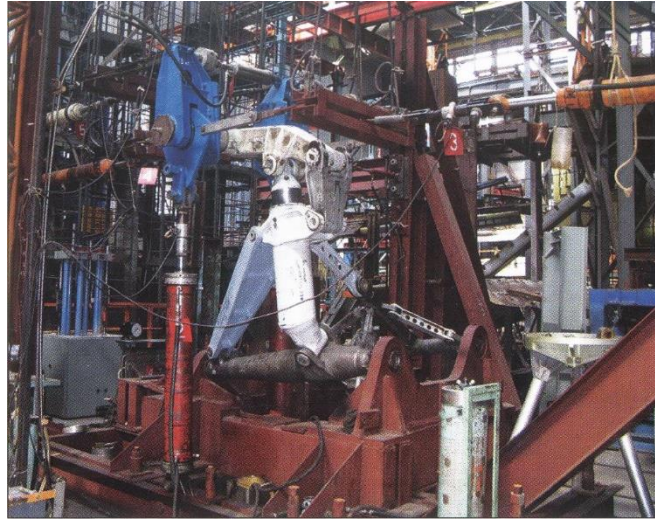
Як впливає із наведених у таблицях 4.3-4.6 даних, стадія розробки завершується випробуванням дослідного зразка та (або) дослідної партії системи. Ця вимога єдина, незалежно від

видів та типів нормативних документів, які регламентують життєвий цикл системи.

Тим не менш, раніше зверталася увага на особливості життєвого циклу складних інженерних систем, однією із яких є тимчасове перекриття стадій та етапів життєвого циклу та ітераційність процесів, які їх визначають. З цього випливає, що випробування найскладніших підсистем і компонентів, розпочаті на ранніх етапах стадії розробки: ескізного проєктування, технічного проєктування, можуть бути ще не завершені повною мірою до етапу випробування дослідного зразка системи в цілому.

Приклад. Для випробувань підсистем управління, пов'язаних із ними гідро- та електросистем, під час випробувань літака Ан-124 «Руслан» було розроблено та виготовлено напівнатуральний моделюючий комплекс стендів. Фахівці виділяли три групи випробувань, які відповідають різним етапам життєвого циклу. Перша – етап ескізного та робочого проєктування, друга – етап будівництва дослідного зразка, третя – етап підготовки та проведення льотних випробувань [43].

На першому етапі ескізного та робочого проєктування дослідний пілотажний стенд представляла спрощена універсальна кабіна екіпажу. Основні аеродинамічні характеристики літака відбивала розроблена математична модель. На цьому етапі вирішувалися завдання вибору аеродинамічного компонування, структури та параметрів системи управління, алгоритмів системи покращення стійкості. Тут же використовувалися стенди відпрацювання штурвального управління, закрилків, передкрилків, інтерцепторів, у яких було реалізовані фізичні моделі каналів управління, виконані із імітаторів агрегатів та проводок. Це дозволило провести експериментальну перевірку розроблюваних систем і отримати дані для вибору ефективних конструкторських рішень; виконати основну частину випробувань систем та агрегатів на спрощеному випробувальному устаткуванні, знизивши тим самим трудомісткість та термін створення натурного стенду механізації крила (рис. 4.13).



а)



б)

Рис. 4.13. а) – стенд ООШ; б) – стенд закрилка [43].

На другому етапі – побудові дослідного зразка, було виготовлено повномасштабну копію кабіни літака, змонтовану на рухомій платформі. З'явилася можливість імітувати не лише візуальну кабіну та позакабінну обстановку, звукову та тактильну, кінестатичну інформацію для пілота, але також забезпечити акселераційний ефект.

Основними дослідницькими завданнями етапу були: визначення відповідності поведінки літака вимогам нормативних документів щодо стійкості, керованості, а також оцінки пілотажних характеристик за умов першого польоту. До першого реального польоту імітаційний «наліт» стенду склав 126 год.

Для проведення випробувань було спеціально розроблено натурний стенд управління «залізний птах», який вміщував стенди окремих підсистем та компонентів: стенд системи штурвального управління, механізації крила, гідравлічної системи [43]. Оригінальною особливістю стенду була гнучкість його конфігурації та модульність елементів. Випробування на стенді розпочалися на етапі робочого проектування та продовжились під час льотних випробувань.

На третьому етапі – льотних випробувань, дослідний пілотажний стенд та натурний стенд управління були з'єднані у єдиний моделюючий комплекс, в якому було консолідовано математичну модель усіх систем управління. Згодом сюди був включений натурний стенд систем автоматичного управління польотом. Це підвищило достовірність отриманої інформації, дозволило знизити ризики під час випробувань, скоротило проведення льотних випробувань.

В результаті лише на цьому випробувальному комплексі – пілотажних стендах, на час закінчення державних (натурних) випробувань імітаційні польоти склали понад 1 тис. годин, що перевищувало випробувальний політ двох дослідних екземплярів літаків. Кількість «досліджених відмов» удвічі перевищила їх за льотних випробувань.

• Складання – інтеграція системи

В реальних умовах, як було представлено у вищенаведених прикладах, паралельно із випробуваннями підсистем, компонентів здійснюється інтеграція - складання дослідного зразка. Іноді дані, отримані під час цих випробувань, враховуються в документації на дослідний зразок системи і, відповідно, впливають на здійсненні інтеграції. Побудова

дослідного зразка (engineering development model – EDM) зазвичай потрібна під час розроблення складних та відповідальних інженерних систем. Цей дослідний зразок повинен бути можливо ближчий за конструкцією та технологією виробництва до майбутньої серійно виготовленої системи.

Планування інтеграції складання дослідної системи здійснюється заздалегідь, оскільки для цього потрібно розробити, виготовити або замовити спеціальне складальне устаткування та технологічне устаткування. При цьому очевидно, що не всі роботи із технологічного підготування виробництва можуть бути виконані в повному обсязі, тому частина виробничих процесів здійснюватиметься за «тимчасовою» схемою.

Ефективність організації процесу інтеграції системи багато в чому залежить від того, наскільки фахово вона була розбита раніше на окремі підсистеми та компоненти, взаємодії між якими прості у здійсненні у виробництві. У загальному вигляді для інтеграції більшості систем характерний наступний порядок дій.

Зазвичай процес інтеграції, дуже умовно, розбивають на дві групи процесів: перша – складання системи із відповідних підсистем, а підсистем із компонентів; друга – підключення, монтаж підсистем у систему. Процес інтеграції, як правило, здійснюється покроково. Так, щоб за один раз на складальних операціях додавали невелику кількість підсистем і можна було проводити випробування і вносити, за необхідності, корекції в конструкцію або технологічний процес. Покрокова процедура

інтеграції та апробації, звичайно, подовжує процес, але дозволяє зберегти контроль та керованість за ним (рис. 4.14).

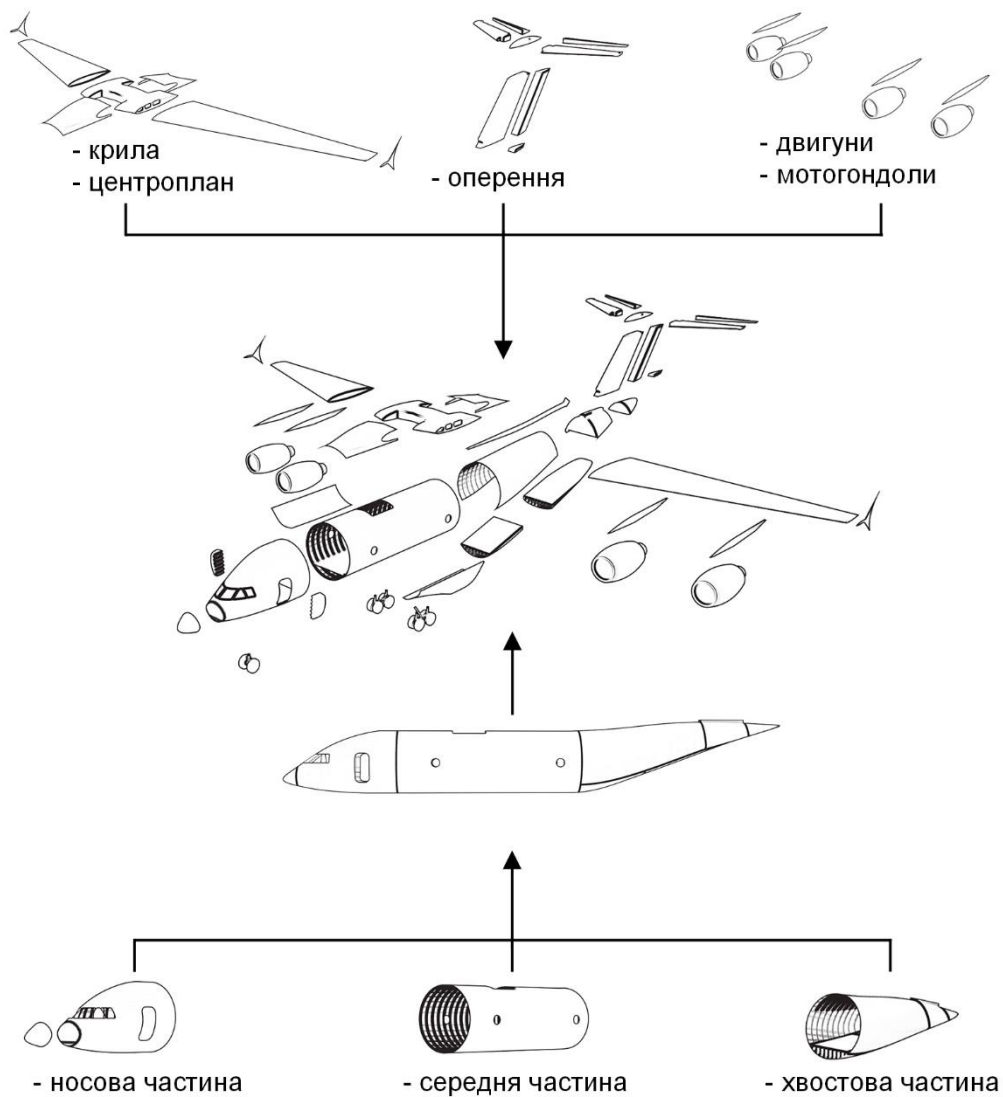


Рис. 4.14. Укрупнений приклад покрокової інтеграції системи «літак».

Для ефективнішої організації процесу інтеграції у літакобудуванні, наприклад, прийнято розробляти спеціальні

технологічні документи, які є своєрідним орієнтиром – обмежувачем фахівців серійного виробництва.

Як приклад, наведений фрагмент складу типової технологічної документації, що використовується у літакобудуванні в ході інтеграції - складанні як дослідного літака, так і серійних. Ця документація відноситься до категорії нормативної та називається – «Директивні технологічні матеріали» (ДТМ) (рис. 4.15–4.17). Розробляють її технологи – від розробника літака або спеціалізовані на цю діяльність організації. Під час запуску літака у серійне виробництво ці документи використовуються технологами серійного заводу як регламенти розроблення технологічних процесів.

• Попередні випробування системи

Після інтеграції системи в єдине ціле, перевірки функціонування її інтерфейсів з'являється можливість з'ясувати, чи відповідає система всім вимогам до її функціонування?

Перевірку на відповідність цим вимогам зазвичай прийнято проводити за кілька циклів. У минулій вітчизняній практиці (ГОСТ 2.103-2013 [74]) передбачалося проведення спочатку «попередніх» випробувань, потім, після усунення виявлених відхилень від заданих вимог, проведення «приймальних» випробувань. За необхідності, обумовлювалася можливість проведення кількох циклів «приймальних» випробувань із присвоєнням конструкторсько-технологічної документації системи, відповідно до літер $O_1, O_2, \dots O_n$ (табл. 4.3).

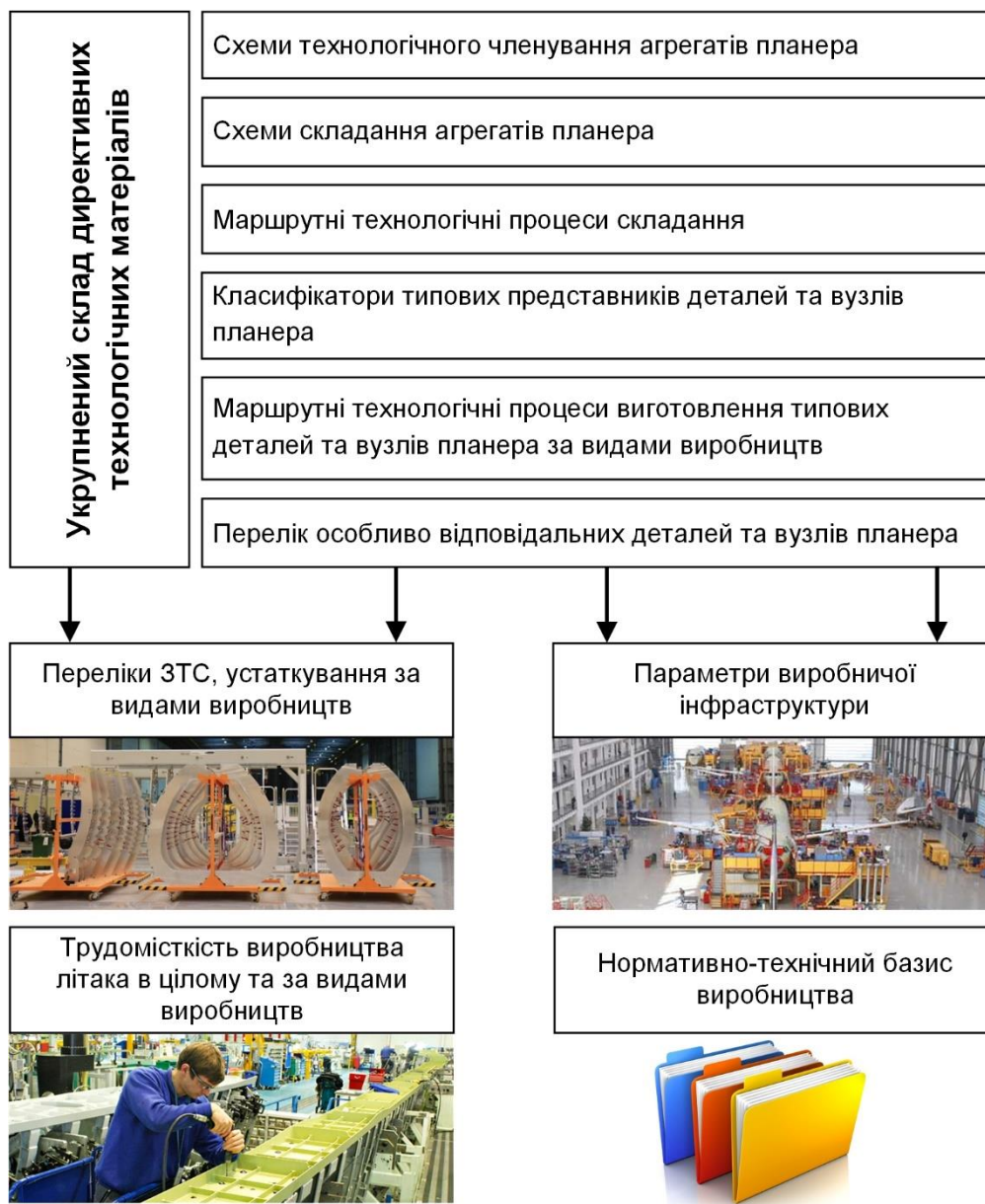


Рис. 4.15. Фрагмент складу «Директивні технологічні матеріали»

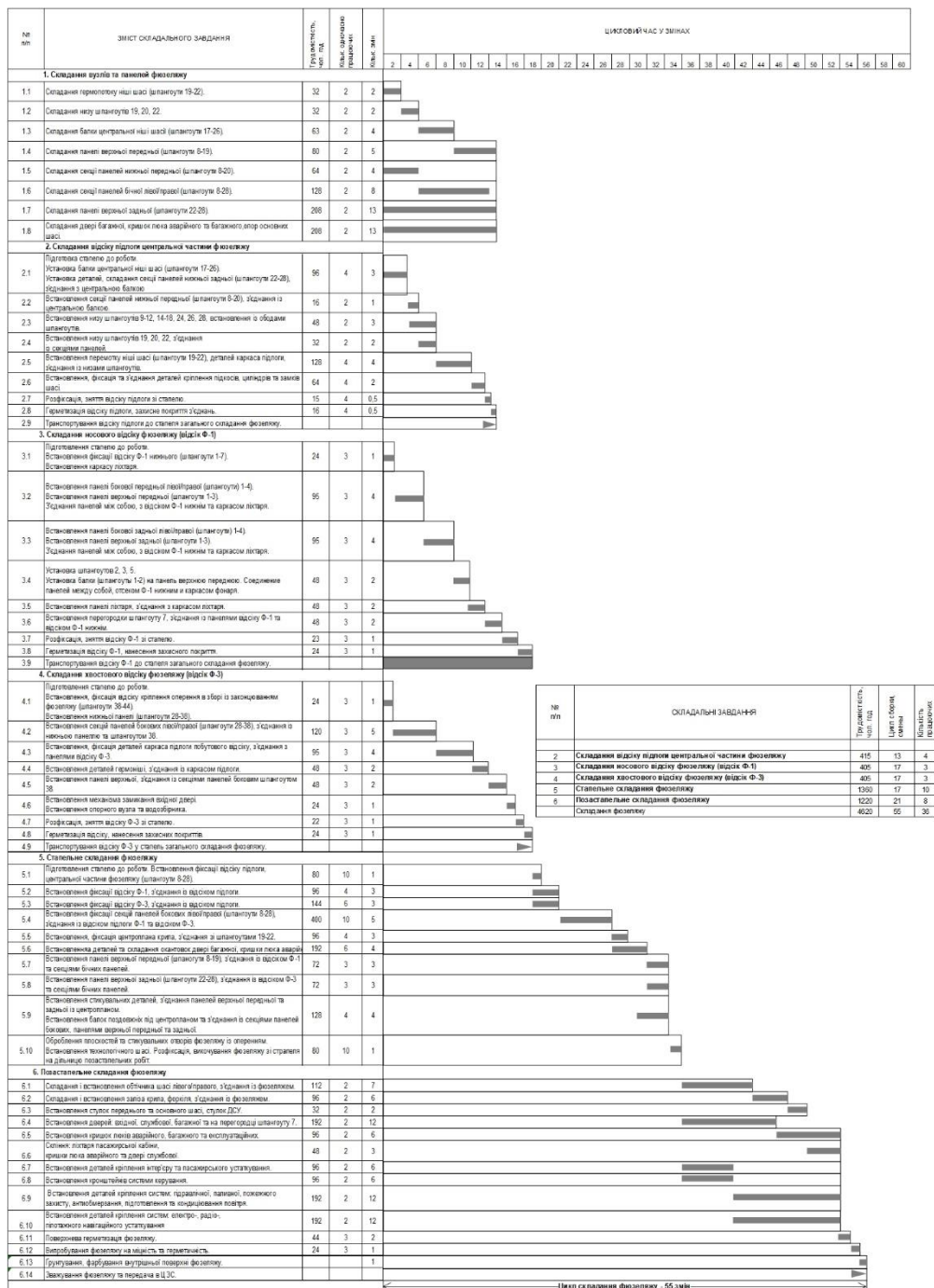


Рис. 4.16. Загальне подання типового циклового графіка складання фюзеляжу літака, який входить до складу ДТМ.

№

п/п

ЗМІСТ СКЛАДАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

Цикловий час, год. хв

Лінійний час, год. хв

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

1. Складання вузлів та панелей фюзеляжу

1.1. Складання першого ряду панелей фюзеляжу

1.2. Складання другого ряду панелей фюзеляжу

1.3. Складання третього ряду панелей фюзеляжу

1.4. Складання четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.5. Складання п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.6. Складання шостого ряду панелей фюзеляжу

1.7. Складання сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.8. Складання восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.9. Складання дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.10. Складання десятого ряду панелей фюзеляжу

1.11. Складання одинадцятого ряду панелей фюзеляжу

1.12. Складання дванадцятого ряду панелей фюзеляжу

1.13. Складання тринадцятого ряду панелей фюзеляжу

1.14. Складання чотирнадцятого ряду панелей фюзеляжу

1.15. Складання п'ятнадцятого ряду панелей фюзеляжу

1.16. Складання шістнадцятого ряду панелей фюзеляжу

1.17. Складання сімнадцятого ряду панелей фюзеляжу

1.18. Складання двадцятого ряду панелей фюзеляжу

1.19. Складання двадцать першого ряду панелей фюзеляжу

1.20. Складання двадцать другого ряду панелей фюзеляжу

1.21. Складання двадцать третього ряду панелей фюзеляжу

1.22. Складання двадцать четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.23. Складання двадцать п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.24. Складання двадцать шостого ряду панелей фюзеляжу

1.25. Складання двадцать сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.26. Складання двадцать восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.27. Складання двадцать дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.28. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.29. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.30. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.31. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.32. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.33. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.34. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.35. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.36. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.37. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.38. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.39. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.40. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.41. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.42. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.43. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.44. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.45. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.46. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.47. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.48. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.49. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.50. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.51. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.52. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.53. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.54. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.55. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.56. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.57. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.58. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.59. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.60. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.61. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.62. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.63. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.64. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.65. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.66. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.67. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.68. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.69. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.70. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.71. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.72. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.73. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.74. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.75. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.76. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.77. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.78. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.79. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.80. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.81. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.82. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.83. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.84. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.85. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.86. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.87. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.88. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.89. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.90. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.91. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.92. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.93. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.94. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.95. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.96. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.97. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.98. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.99. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.100. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.101. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.102. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.103. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.104. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.105. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.106. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.107. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.108. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.109. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.110. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.111. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.112. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.113. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.114. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.115. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.116. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.117. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.118. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.119. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.120. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.121. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.122. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.123. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.124. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.125. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.126. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.127. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.128. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.129. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.130. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.131. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.132. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.133. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.134. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.135. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.136. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.137. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.138. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.139. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.140. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.141. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.142. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.143. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.144. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.145. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.146. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.147. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.148. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.149. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.150. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.151. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.152. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.153. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.154. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.155. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.156. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.157. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.158. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.159. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.160. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.161. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.162. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.163. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.164. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.165. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.166. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.167. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.168. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.169. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.170. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.171. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.172. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.173. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.174. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.175. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.176. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.177. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.178. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.179. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.180. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.181. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.182. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.183. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.184. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.185. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.186. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.187. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.188. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.189. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.190. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.191. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.192. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.193. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.194. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.195. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.196. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.197. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.198. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.199. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.200. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.201. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.202. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.203. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.204. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.205. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.206. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.207. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.208. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.209. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.210. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.211. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.212. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.213. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.214. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.215. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.216. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.217. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.218. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.219. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.220. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.221. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.222. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.223. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.224. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.225. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.226. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.227. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.228. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.229. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.230. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.231. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.232. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.233. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.234. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.235. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.236. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.237. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.238. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.239. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.240. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.241. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.242. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.243. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.244. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.245. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.246. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.247. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.248. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.249. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.250. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.251. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.252. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.253. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.254. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.255. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.256. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.257. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.258. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.259. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.260. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.261. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.262. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.263. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.264. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.265. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.266. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.267. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.268. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.269. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.270. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.271. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.272. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.273. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.274. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.275. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.276. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.277. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.278. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.279. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.280. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.281. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.282. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.283. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.284. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.285. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.286. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.287. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.288. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.289. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.290. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.291. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.292. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.293. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.294. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.295. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.296. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.297. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.298. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.299. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.300. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.301. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.302. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.303. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.304. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.305. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.306. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.307. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.308. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.309. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.310. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.311. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.312. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.313. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.314. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.315. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.316. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.317. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.318. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.319. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.320. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.321. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.322. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.323. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.324. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.325. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.326. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.327. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.328. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.329. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.330. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.331. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.332. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.333. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.334. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.335. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.336. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.337. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.338. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.339. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.340. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.341. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.342. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.343. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.344. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.345. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.346. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.347. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.348. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.349. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.350. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.351. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.352. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.353. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.354. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.355. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.356. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.357. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.358. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.359. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.360. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.361. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.362. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.363. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.364. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.365. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.366. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.367. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.368. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.369. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.370. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.371. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.372. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.373. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.374. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.375. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.376. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.377. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.378. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.379. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.380. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.381. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.382. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.383. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.384. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.385. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.386. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.387. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.388. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.389. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.390. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.391. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.392. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.393. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.394. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.395. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.396. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.397. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.398. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.399. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.400. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.401. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.402. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.403. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.404. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.405. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.406. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.407. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.408. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.409. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.410. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.411. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.412. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.413. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.414. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.415. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.416. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.417. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.418. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.419. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.420. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.421. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.422. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.423. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.424. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.425. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.426. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.427. Складання тридцять четвертого ряду панелей фюзеляжу

1.428. Складання тридцять п'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.429. Складання тридцять шестого ряду панелей фюзеляжу

1.430. Складання тридцять сьомого ряду панелей фюзеляжу

1.431. Складання тридцять восьмого ряду панелей фюзеляжу

1.432. Складання тридцять дев'ятого ряду панелей фюзеляжу

1.433. Складання тридцять першого ряду панелей фюзеляжу

1.434. Складання тридцять другого ряду панелей фюзеляжу

1.435. Складання тридцять третього ряду панелей фюзеляжу

1.4

У сучасній вітчизняній практиці під час розроблення та поставлення на виробництво систем озброєння та військової техніки передбачаються два цикли випробувань: «попередні» випробування дослідного зразка та «державні» (міжвідомчі) випробування. Після корекції технічної документації, окремо – прийняття рішення щодо організації серійного виробництва (табл. 4.5).

У зарубіжній практиці випробування інтегрованих систем, також передбачено проводити за два цикли: спочатку «доводочні» випробування, потім «натурні» випробування (табл. 4.4).

Доводочні випробування системи проводять з метою верифікації системи на відповідність специфікаціям, тобто **вимогам до показників функціонування системи** в цілому та її найважливіших підсистем.

Верифікація системи загалом є завершальною частиною процесу розроблення, здійснює її розробник системи із урахуванням даних розробників найбільш відповідальних її компонентів та підсистем.

На даному етапі випробувань має бути забезпечена ретельна перевірка поведінки системи за взаємодії зовнішніх впливів та впливу навколишнього середовища. У різноманітних планах доводочних випробувань передбачають реальне відтворення або імітацію впливу ключових зовнішніх факторів із забезпеченням виміру та реєстрації відгуку системи на ці впливи.

Після проведення «доводочних» (попередніх) випробувань, усунення виявлених відхилень від показників функціонування системи приступають до її натурних випробувань.

- **Натурні випробування, атестація, сертифікація**

Натурні випробування чи державні, або приймальні випробування, незалежно від різниці у термінології, переважно спрямовані на встановлення відповідності реальних результатів випробувань не **показниками функціонування**, а безпосередньо – **вимогам призначення системи**.

Приклад. Для авіаційної системи такими вимогами призначення можуть бути забезпечення десантування вантажу заданого габариту та маси, доставка його із певною швидкістю безпосадкового польоту на задану відстань, посадка на погано обладнаному аеродромі та багато іншого.

Метою натурних випробувань є підтвердження (валідація) того, що **вимоги призначення системи**, викладені у узгоджених стартових документах (технічному завданні), та вимоги до її функціонування забезпечені. Зазначимо ще раз, що встановлення відповідності показників функціонування системи (верифікація) вимогам специфікації є метою процесу доводочних випробувань. Для складних інженерних систем витрати на ці випробування дуже суттєві. Наприклад, в авіабудуванні – вимоги отримання сертифіката типу повітряного судна зазвичай зумовлюють необхідність виконання більше сотні польотів на різних режимах і в найскладніших ситуаціях.

За результатами позитивних доводочних, натурних або попередніх чи приймальних (державних, міжвідомчих) випробувань оформлюються відповідні документи, які свідчать про готовність системи до виробництва.

Залежно від замовника системи, від її призначення, типу, ступеня складності можуть бути різні документи. У цивільному авіабудуванні за результатами натурних випробувань

оформляється так званий «сертифікат типу», який видається національною авіаційною адміністрацією. Для розширення галузі використання системи потрібне оформлення подібного міжнародного сертифікату, європейського чи американського (FAR, GAR), раніше на території СНД – сертифіката МАК – міжнародного авіаційного комітету.

В галузі оборонної промисловості діють свої особливі регламенти та документи, що підтверджують валідацію – атестацію системи.

Пізнавальним є спрощене подання загального характеру участі різних категорій фахівців по мірі розвитку життєвого циклу системи на стадіях передрозробки та розробки (рис. 4.18).

4.4 Підсумки

• Підсумки етапу ескізного проєктування

Основною метою етапу ескізного проєктування є зниження до прийнятного ступеня невизначеності системи, властивій концептуальному етапу її розробки. Найбільш прийнятними шляхами зниження ризиків функціонування системи є ширше використання в ній функціональних проєктів підсистем і компонентів, апробованих у попередніх системах та які раніше пройшли валідацію. Для заново застосовуваних підсистем та компонентів етап ескізного проєктування завершується розробкою зразків компонентів, що пройшли валідацію прототипів, які супроводжуються проєктною документацією, що дозволяє виробляти інженерно-технічні розробки та реалізувати етап технічного проєктування.

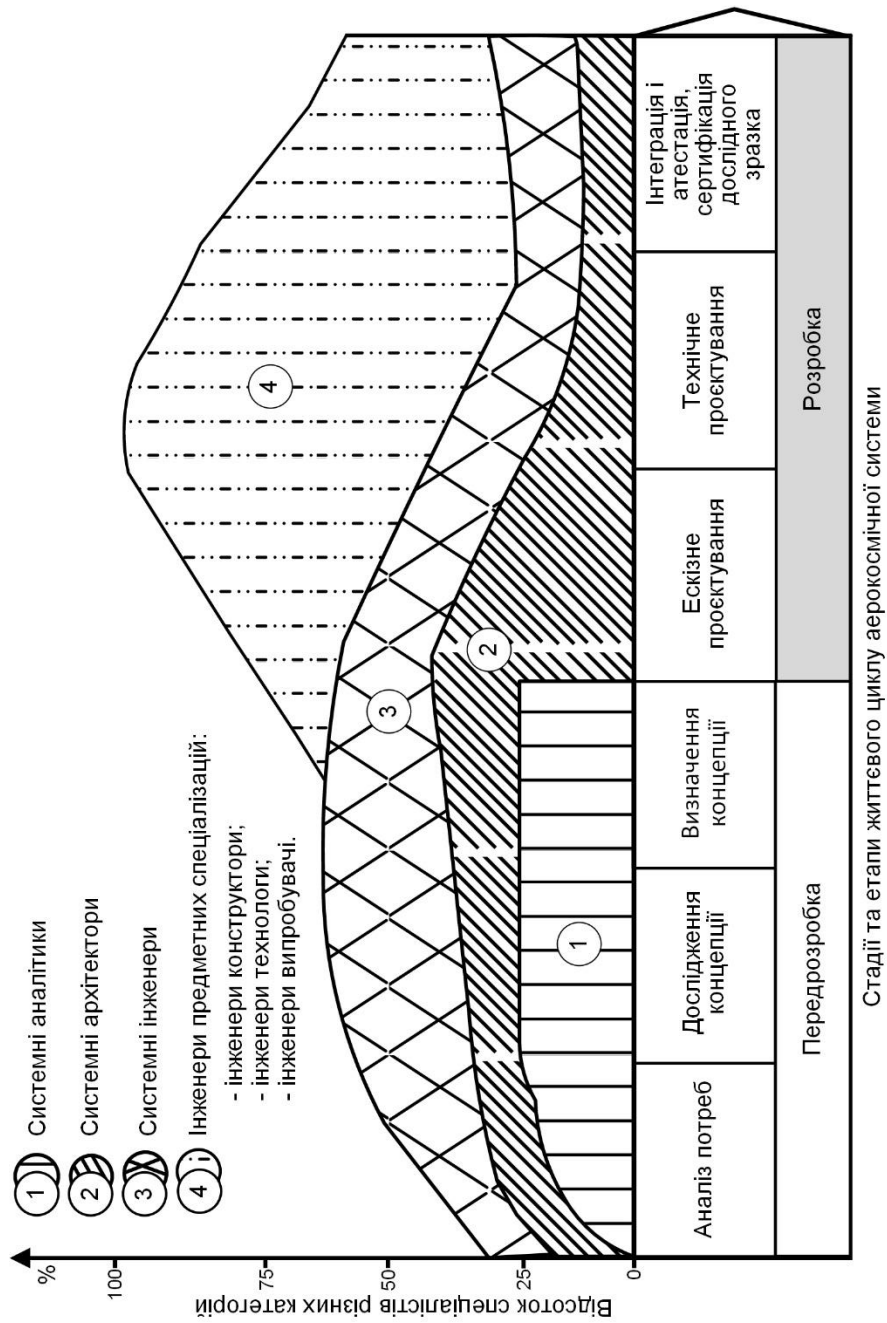


Рис. 4.18. Спрощене подання, адаптоване щодо наведеної в [6] участі різних категорій фахівців зі стадій та етапів передрозробки та розробки системи.

Виділяють чотири основні типові дії, які дозволяють реалізувати етап ескізного проєктування:

- Перша дія – проведення аналізу вимог, коли ще раз необхідно перевірити актуальність на даний момент сформульованих на попередньому етапі функціональних вимог, а також виявити компоненти, які потребують більш ретельного розроблення. За відношенням до виявлених компонентів, що вимагають розробки, здійснюється їх розроблення на рівні ескізного подання та відповідна валідація передачі на наступний етап життєвого циклу.
- Друга дія, що відноситься до етапу ескізного проєкту життєвого циклу системи – проведення аналізу функціонування. Основною метою цієї дії є виявлення ознак типізації компонентів системи, які потребують розроблення. Виділено три типи таких компонентів залежно від вимог до показників функціонування, ступеня критичності поведінки для системи та вимог зовнішнього середовища. Особливої уваги вимагає виявлення компонентів системи, для яких показники функціонування мають перевищувати досягнуті раніше межі у попередніх системах чи близьких аналогах. У зоні відповідальності системного інженера, крім іншого, є аналіз взаємодії помірно-складних компонентів через різні інтерфейси. Необхідно тримати у фокусі зору ту властивість інтерфейсів, що збільшення їх числа може кратно збільшувати ризики невизначеності поведінки елементів системи та, можливо, системи загалом.
- Третя дія – це ескізне проєктування системи. Основним завданням тут є моделювання поведінки та розроблення прототипів, зразків компонентів системи, які потребують

фізичного підтвердження досягнення необхідних функціональних показників. Рекомендується певний порядок дій та критерії, які дозволяють виявляти зони особливої уваги системи, що вимагають моделювання поведінки та критерії, які дозволяють відносити компоненти системи до категорії особливо відповідальних, функціонування яких пов'язане із підвищеними чи високими ризиками. Як ефективний метод, що дозволяє об'єднання зусиль системних інженерів та профільних, вузькоспеціалізованих фахівців, рекомендовано так званий підхід «паралельної інженерії». Він, крім іншого, виявляється ефективним для виявлення та визначення об'єктів майбутньої системи та її компонентів, що вимагають розроблення та випробувань.

- Четвертою завершальною дією, яка відноситься до етапу ескізного проєктування, є організація та проведення випробування. Метою тут є отримання підтверджуючих даних, що всі проблеми, виявлені в ході даного етапу, успішно вирішені. Для цього зазвичай використовуються так звані стендові випробування. На цьому етапі ескізного проєктування випробуванням піддаються підсистеми, компоненти та їхні ключові субкомпоненти.

Звертається увага на важливу функцію системного інженера, яку він має реалізувати на етапі планування та проведення випробувань – пріорітизація випробувань з метою максимізації їх результатів та мінімізації витрат.

Показано, що визначення реалістичної моделі випробувань є також важливим завданням системного інженера. У цьому зв'язку рекомендовано використовувати компромісну «середню позицію» вибору моделі випробування, коли випробуваний

компонент вміщується у прототип підсистеми, а решта системи та її оточення – імітується.

• Підсумки етапу технічного проектування

Основною метою етапу технічного проектування є формування комплекту документації, яка містить спроектовані та типові компоненти, деталі, інтегровані в систему, яка повинна задовольняти всі вимоги надійності, безпеки функціонування, технологічності конструкцій системи, ремонтпридатності та подальшої утилізації системи. В результаті проєктні рішення знаходять фізичне втілення у формі апаратних та програмних елементів. У складі документації – актуалізовані плани управління програмою створення системи, ієрархічна структура робіт, допоміжні плани та графіки виконання робіт із будівництва системи.

На фініші даного етапу, в результаті проведених на попередніх етапах досліджень та випробувань, стендових випробувань, проведених на етапі технічного проектування, знання щодо поведінки нових компонентів, мають бути еквівалентні знанням про компоненти, запозичені із попередніх систем.

Ще раз звернута увага на те, що послідовність робіт, які включаються до етапу життєвого циклу системи, досить умовна, на практиці постійно мають місце «ітераційні петлі», перекриття робіт, різних суміжних етапів і навіть стадій, особливо ця тенденція, проявляється в міру розвитку та матеріалізації системи.

Виділяють чотири основні типові дії етапу технічного проектування:

- Перша дія – вкотре проводиться аналіз вимог до функціонування системи, підсистем та компонентів на актуальність, несуперечність, появу нових «вхідних». Необхідно пам'ятати, що розвиток і матеріалізація системи постійно додає нові відомості, як про компоненти, що заново розробляються, так і по раніше використовуваних компонентах. Окремої уваги вимагають внутрішні та зовнішні інтерфейси системи. Можливий прояв нових вимог, що впливають з інтеграції окремих елементів: габаритності системи, параметрів логістики. Переносити ці роботи на інші етапи недоцільно, оскільки це загрожує великими часовими та фінансовими витратами.
- Друга дія, яка виконується в рамках етапу технічного проєктування – проведення в черговий раз аналізу функціонування, особливістю якого є забезпечення максимально можливої незалежності компонентів між собою та системою в цілому. Робиться це для того, аби полегшити агрегування, забезпечити модульність та, зрештою, полегшити обслуговування та можливу модернізацію. Розглянуті три критерії, які рекомендується використовувати під час аналізу функціонування та оцінки ступеня модульності компонентів: *значущість, специфічність та уніфікованість*.
- Третьою дією, яка реалізується на етапі технічного проєктування, є комплекс робіт із *проєктування нових компонентів*. Основна мета – реалізація проєктних рішень та фізичне втілення їх у формі апаратних та програмних елементів. Компоненти, які не проєктувалися раніше, підлягають проєктуванню, виготовленню, випробуванню,

об'єднанню у підсистеми для того, щоб на наступному етапі інтеграції, атестації–сертифікація дослідного зразка системи такий зразок був складений та адекватно випробуваний. Підкреслюється визначальна роль системного інженера на етапі перетворення проєктних рішень у вигляді конструкторсько-технологічної документації в апаратні та програмні засоби під час виготовлення дослідного зразка системи.

- Четвертою типовою дією етапу є валідація вироблених проєктних рішень. Показано, що планування випробувань, досліджень, метою яких є валідація проєктних рішень, слід починати із ранніх етапів стадії розробки. Валідація проєктних рішень, у певному сенсі, безперервний процес, який починається із етапу ескізного проєктування і весь час, у міру готовності конструкторсько-технологічної документації, триває безперервно, переходячи на більш пізні етапи і навіть стадії.

Підкреслюється дуже важлива роль системного інженера у процесі валідації на етапі технічного проєктування. В ході виготовлення компонентів системи для валідації на цій стадії об'єктивно відсутні умови, які могли б гарантувати повну подібність технологічних режимів, подібність заготовок, подібність інших вагомих факторів під час виготовлення дослідного компонента і, в майбутньому, під час виготовлення його в серійному виробництві. Дати вичерпну відповідь, прийняти остаточне рішення щодо ступеня відповідності імітаційної фізичної моделі, отриманої в дослідному виробництві, реальній ситуації в майбутньому серійному

виробництві, є однією із відповідальних функцій системного інженера.

- **Підсумки етапу інтеграції, атестації–сертифікації
дослідного зразка**

Основною метою етапу є атестація складеної воєдино системи на відповідність заявленим вимогам до її функціонування та вимогам призначення.

Досягнення цієї мети забезпечується такими діями: ефективним плануванням випробувань, обґрунтованим визначенням випробувального устаткування, інтеграцією – складання системи воєдино та її випробуванням із наступною атестацією–сертифікацією.

У поняття планування випробувань прийнято включати три компоненти: планування інтеграції, планування організації випробувань і, власне, планування проведення доводочних (попередніх) і натурних (приймальних) випробувань. У нормативній документації цей вид випробувань може називатися по-різному, але його сутність однакова.

На даному етапі сенс випробувань значною мірою пов'язаний із можливими необхідними корекціями у раніше розроблених стендових установках, врахуванням можливості дооснащення їх необхідною апаратурою та забезпеченням паралельного проведення стендових та доводочних випробувань.

Складання-інтеграція системи часто здійснюється паралельно зі стендовими випробуваннями, розпочатими на етапі ескізного та технічного проектування. Дані результатів цих випробувань враховуються під час будівництва дослідного зразка системи.

Роботи із планування складання–інтеграції починаються заздалегідь, оскільки потрібний значний час та інші ресурси для розроблення та замовлення технологічного устаткування. Тим не менш, необхідно мати на увазі, що частина технологічних процесів, які забезпечують створення дослідного зразка, будуть здійснюватися за «тимчасовою схемою».

Ефективність процесу складання–інтеграції багато в чому залежить від того, наскільки фахово система раніше була розбита на підсистеми та компоненти і чи вдалося забезпечити їх поєднання якомога простішим способом у виробництві. Рекомендується передбачати покрокову інтеграцію, що забезпечує найбільший контроль та керованість процесу.

Метою цих процедур є встановлення відповідності показників системи всім заявленим вимогам функціонування та прийняття рішень щодо можливості її подальшого виробництва та експлуатації.

Для цього зазвичай передбачається проведення двох циклів випробувань: доводочних (попередніх) та натурних (приймальних). Доводочні випробування проводять із метою верифікації показників функціонування вимог специфікації. Натурні випробування та атестація проводяться із метою здійснення валідації системи – підтвердження того, що вона відповідає всім вимогам призначення і може бути рекомендована до виробництва та експлуатації.

Питання для самоконтролю глави 4

1. Які розрізняються типові для методології системної інженерії основні дії на етапі ескізного проєктування?

2. В чому сутність аналізу функціональних вимог на етапі ескізного проєктування у системі (на стадії розробки)?
3. В чому сутність аналізу функціонування на етапі ескізного проєктування у системі (на стадії розробки)?
4. В чому сутність розроблення ескізного проєкту на етапі ескізного проєктування у системі (на стадії розробки)?
5. В чому сутність випробування на етапі ескізного проєктування у системі (на стадії розробки)?
6. В чому сутність аналізу вимог на етапі технічного проєктування у системі (на стадії розробки)?
7. В чому сутність аналізу функціонування та ефективності проєктування на етапі технічного проєктування у системі (на стадії розробки)?
8. В чому сутність проєктування компонентів на етапі технічного проєктування у системі (на стадії розробки)?
9. В чому сутність валідації на етапі технічного проєктування у системі (на стадії розробки)?
10. В чому сутність планування випробувань на етапі інтеграції, атестації-сертифікації дослідного зразка (на стадії розробки системи)?
11. В чому сутність визначення випробувального устаткування на етапі інтеграції, атестації-сертифікації дослідного зразка (на стадії розробки системи)?
12. В чому сутність складання – інтеграції системи на етапі інтеграції, атестації-сертифікації дослідного зразка (на стадії розробки системи)?

13. В чому сутність попередніх випробувань системи на етапі інтеграції, атестації-сертифікації дослідного зразка (на стадії розробки системи)?
14. В чому сутність натурних випробувань, атестації, сертифікації на етапі інтеграції, атестації-сертифікації дослідного зразка (на стадії розробки системи)?

Глава 5: Стадія построзробки системи

5.1 Продовження ролі системного інженера

Ця стадія може бути реалізована, якщо дві попередні стадії життєвого циклу успішно завершені та прийнято, санкціоновано рішення стосовно запуску системи у виробництво та подальшу експлуатацію.

Здавалося б, що основні функції та завдання системної інженерії вичерпуються першими двома стадіями. Системні інженери зробили все, що необхідно і системі дана «дорога в життя». Проте така позиція неправильна.

Задумавши ідею, втіливши її у матеріальний образ у вигляді дослідного зразка, який пройшов валідацію, організувавши атестацію системи, надалі стоїть завдання задовольняти потреби, заради яких система і створювалася. Вона ж не створювалася для отримання атестаційного документа того чи іншого типу. Вона створювалася, аби задовольнити потреби замовника і, якщо це комерційна система – забезпечити прибуток від реалізації чи, для некомерційних систем, із мінімальними витратами забезпечити вимоги споживача.

Таким чином, роль системної інженерії та системних інженерів не має обмежуватися завданнями перших двох стадій.

Цілком очевидно, що частина завдань, які реалізуються на етапі виробництва: організація та забезпечення серійного виробництва системи, формулюється на стадії розробки системи. Система має бути технологічною у виробництві, ремонтпридатною, надійною в експлуатації, має бути передбачений її можливий розвиток – модернізація. Ці завдання,

безумовно, входять у прерогативу функцій системного інженера.

У системних інженерів є свої завдання і безпосередньо на етапі виробництва системи – стадії її построзробки. Як показує практика, особливо протягом перших періодів освоєння системи у серійному виробництві – для складних систем цей період займає кілька років, як і раніше важлива роль розробника, яку здійснює системний інженер. Вона укрупнено полягає у контролі, моніторингу освоєння серійного виробництва, видачі дозволів на тимчасові відхилення від документації розробника, а також внесення необхідних коректив у розроблену документацію.

На етапі експлуатації також важлива роль системного інженера. Вона проявляється у вирішенні непередбачених проблем, які майже завжди супроводжують, особливо перші періоди експлуатації системи. Тут дуже суттєвий оперативний зв'язок із розробником, затребувані його консультації експлуатанту, можливо виникає потреба в корекції конструкторсько-технологічної та експлуатаційної документації.

В останні десятиліття стає все більш актуальним етап утилізації, який включений до стадії построзробки.

Виявляється, що його основа закладається також на стадії **розробки** системи, проте дедалі більше проявляється у ході організації самих процесів утилізації, у чому значна роль системних інженерів.

За вимогами сучасних нормативних документів:

- NATO STANDARD: AAP-20 [36]; AAP-48 [37];
- ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [2], та низки інших,

розробник має передбачити процеси вилучення із обігу, списання та безпечної утилізації системи. Організація цих дій також відноситься до сфери діяльності системної інженерії.

5.2 Етап виробництва системи

Метою цього етапу є забезпечення ефективного виробництва системи, яка відповідає розробленій технічній документації та відповідає потребам замовника за функціональними властивостями. Система має бути поставлена для експлуатації в обумовлені терміни, безпечно експлуатуватися заданий час, у результаті має бути здатною до безпечного вилучення та утилізації.

Слід ще раз наголосити, що забезпечення досягнення мети визначається не лише на часовому інтервалі, який відповідає виробничому циклу. Багато процесів, створені задля досягнення цієї мети, вони передбачаються і здійснюються, сутнісно, на усьому попередньому протязі життєвого циклу системи.

Так, на стадії **передрозробки** необхідно концептуально передбачити створення ефективного виробництва, можливо, визначити його коопераційну основу або принципи кооперації, а також джерела покриття постійних статей витрат та їхню частку у майбутній собівартості системи.

На стадії розробки визначаються основні постачальники компонентів та підсистем і таким чином визначається від 50% до 80% і більше виробничої собівартості системи та, відповідно, ризиків відмов під час експлуатації. На цій же стадії, на її останньому етапі – розробці технічного проєкту, здійснюється документарне підготування до серійного виробництва системи. Саме тут визначається технологічність системи у

виробництві. Якщо цьому етапі прийняті неефективні конструкторсько-технологічні рішення, виправити згодом їх буде практично неможливо. Таким чином, віднесення цих процесів до етапу виробництва більш логічне, а не тимчасове. На етапі виробництва, по суті, виявляються результати робіт, організованих на попередніх стадіях та етапах життєвого циклу системи. З урахуванням цієї умовності можна назвати чотири основні дії етапу «Виробництво», перелічені на рисунку 5.1. Стисло розглянемо їх.

- **Забезпечення технологічності системи у виробництві**

З певною часткою спрощення склад процедур стадій передрозробки та розробки, які в основному визначають технологічність системи у виробництві, наведено на рисунках 5.2-5.3.

Очевидно, що концептуальні рішення, які впливають на технологічність системи у виробництві, приймаються на етапах стадії передрозробки та етапі ескізного проектування стадії розробки. Тим не менш, за обсягом, якістю та впливом на сукупний результат проєктні рішення, які приймаються на етапі технічного проектування, є, ймовірно, найбільш вагомими у визначенні технологічності системи.

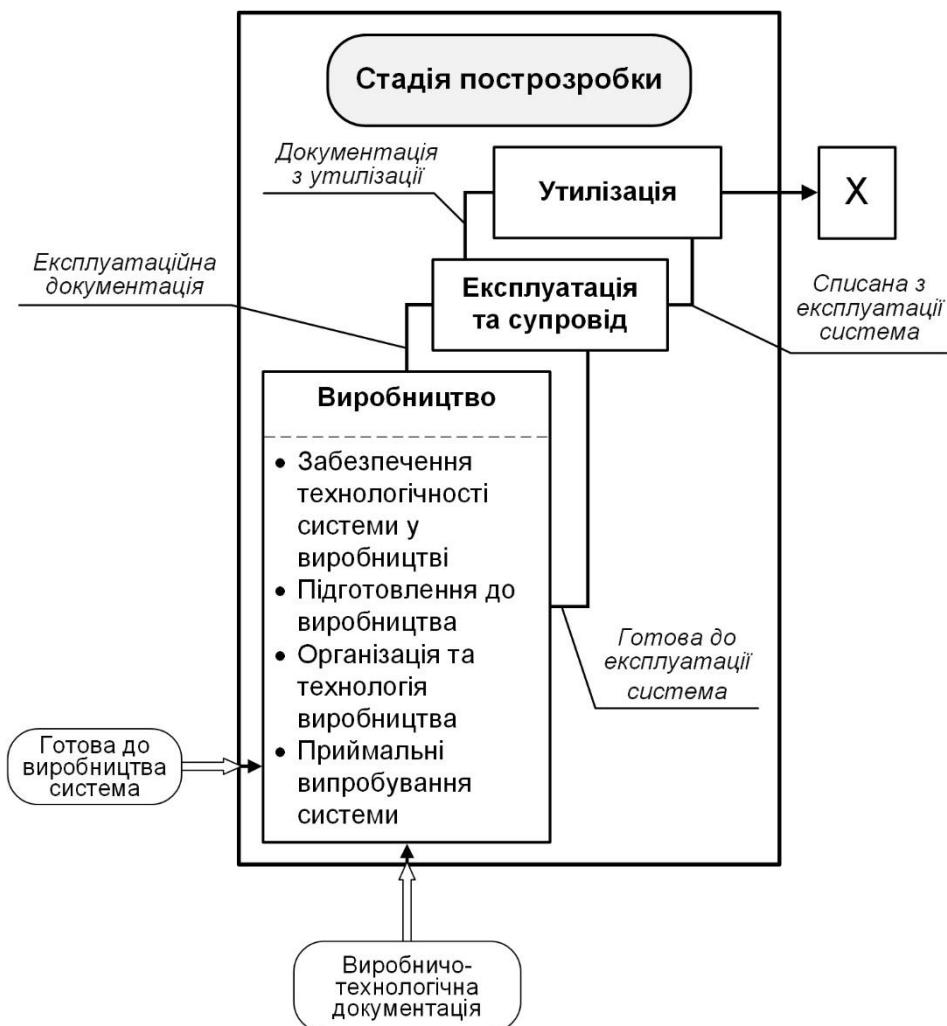


Рис. 5.1. Стадія построзробки: етап виробництво.

Для того, щоб конструкторські рішення могли бути найефективніше реалізовані у виробництві технологами, розробляються рекомендаційні нормативні документи типу згаданих у попередньому розділі – «Директивні технологічні матеріали» та низку їм подібних за сутністю.

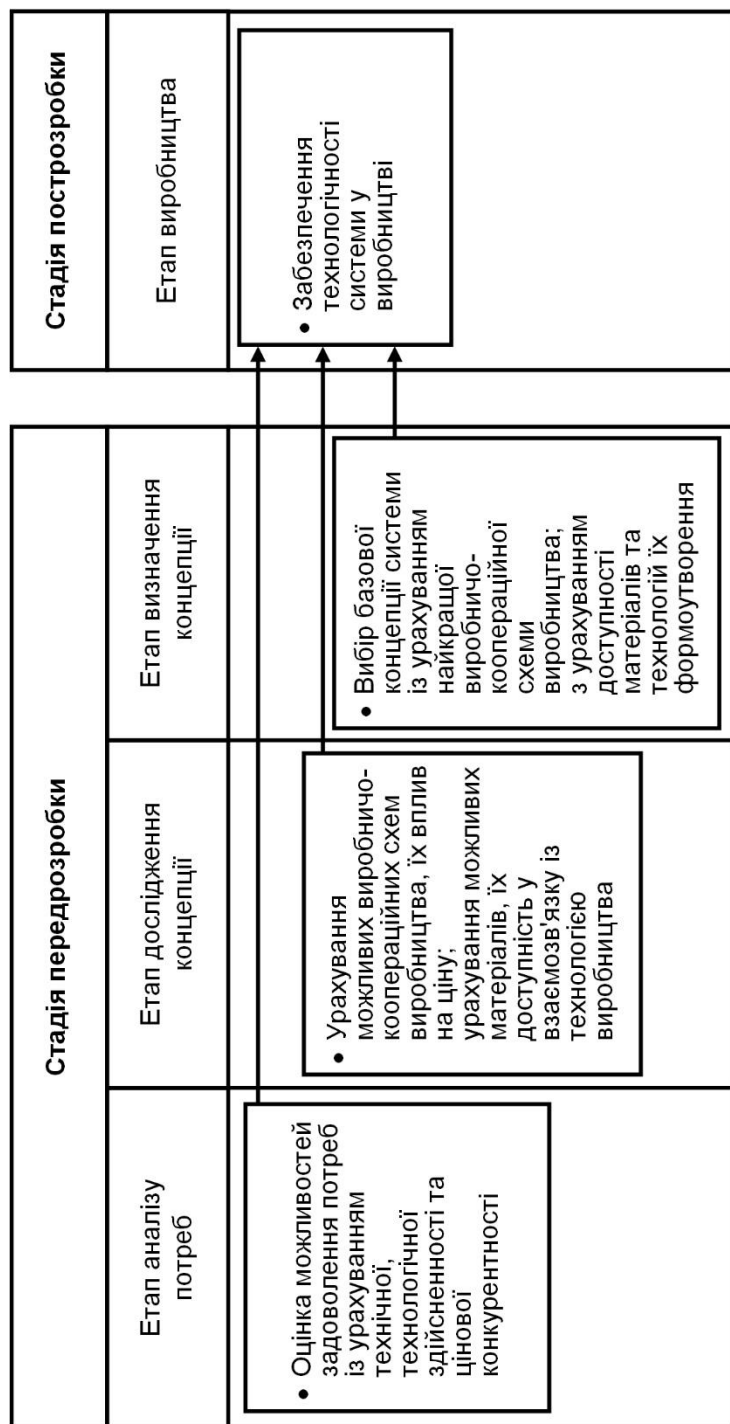


Рис. 5.2. Найважливіші процедури стадії передрозробки системи, що визначають технологічність системи у виробництві.

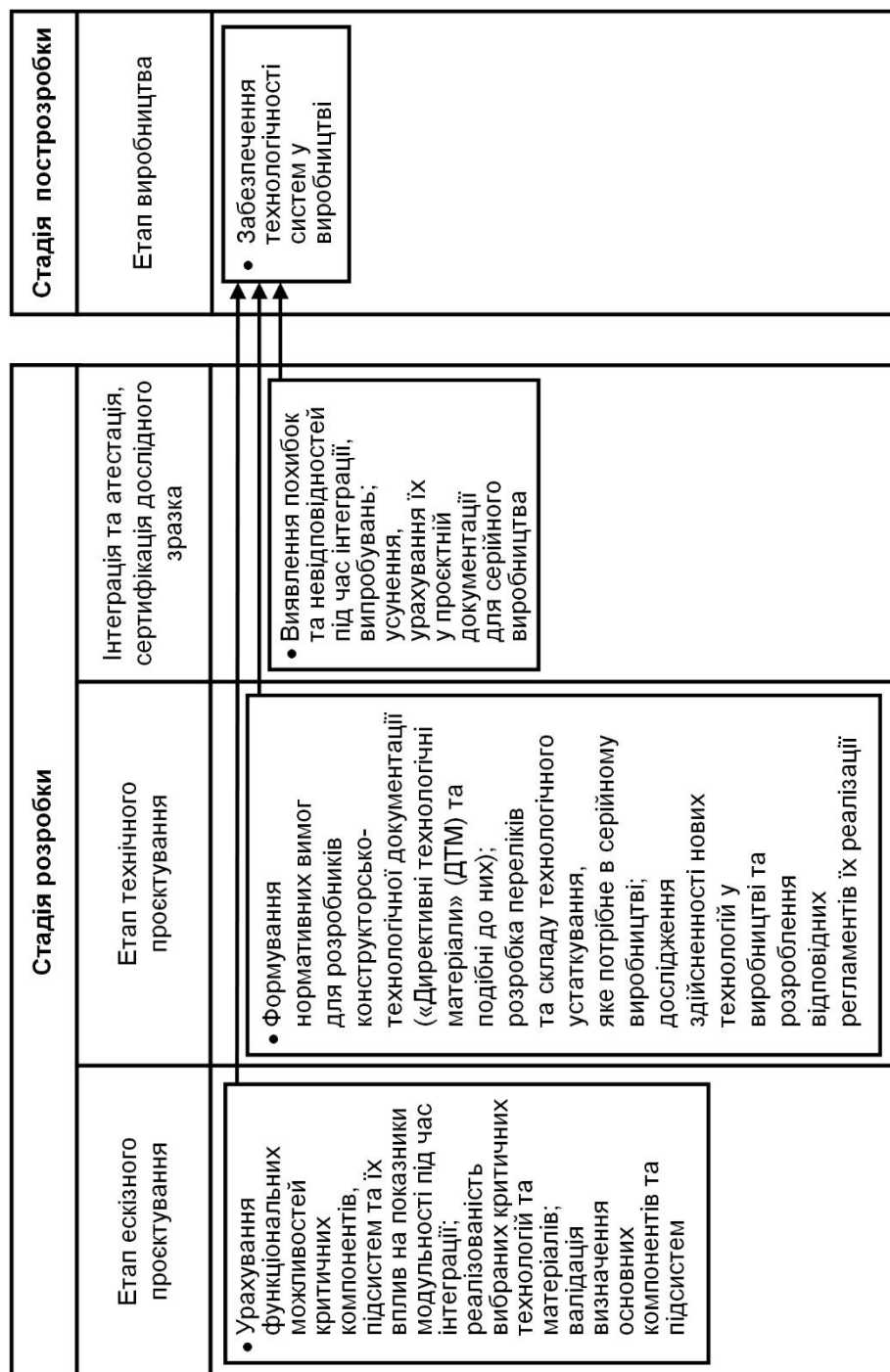


Рис. 5.3. Найважливіші процедури стадії розробки системи, що визначають технологічність системи у виробництві.

У них моделюється майбутній вигляд виробництва: структура кооперації, основні постачальники, концентрація і локація виробничих процесів інтеграції–складання і валідації системи. Визначається модульність системи, її наповнення монтажами. Окремо виявляються технологічні процеси, що вимагають підвищеної уваги, які забезпечують виробництво особливо відповідальних деталей та компонентів, або які реалізуються вперше.

Таке урахування **особливостей виробництва** під час проєктування прийнято називати «**паралельною інженерією**» [6].

Із даних, наведених на рисунках 5.2-5.3, певною мірою можна судити про сутність терміну «паралельна інженерія». Роль системних інженерів у її здійсненні велика на всіх етапах вироблення та здійснення проєктних рішень.

На стадії передрозробки системні інженери окремо фокусуються на виробничій здійсненості системи, можливих порогах витрат. Пропоновані до застосування технології, пошук балансу між інноваційністю концептуальних технологічних проєктних рішень та ризиками, термінами, фінансами – це предмет їхньої уваги.

На стадії розробки особлива увага системних інженерів приділяється впливу вибраних технологічних процесів на сумісність інтерфейсів компонентів та підсистем, що покликано мінімізувати ризики та витрати на виробничому етапі.

На стадії виробництва всі закладені на попередніх стадіях та етапах можливості, які можуть забезпечити технологічність системи у виробництві, мають бути повною мірою реалізовані. Враховуючи, що системні інженери окремо виділяли це

завдання, фокусувалися на ньому, вони можуть ефективно забезпечити взаємодію між розробниками системи та фахівцями виробництва, вирішуючи питання, які постійно виникають. Як свідчить практика, чим складніша система, тим більший інтервал часу від створення проєктної документації, спорудження дослідного зразка, його випробування та початком серійного виробництва. За цей час розвиваються технології, виявляються нові обставини, що потребують корекції проєктних рішень. Все це належить врахувати, оформити та реалізувати вже у процесі виробництва.

• Підготовлення до виробництва

Для складних інженерних систем підготовлення до виробництва, як правило, дуже важливий елемент роботи. Логічно ці процеси, як вже стало звичним, відносяться до етапу виробництва, але починаються на часовому інтервалі, що відноситься до етапів технічного проєктування та інтеграції.

По суті, реалізація дій із підготовлення до виробництва починається, коли завершується створення дослідного зразка, розроблено та випробувано багато інноваційних технічних та технологічних рішень, розроблено та випробувано технологічне оснащення та пристрої, необхідні для виробництва дослідного зразка.

Після того, як прийняті концептуальні рішення щодо необхідності використання того чи іншого технологічного устаткування, починається підготовлення до серійного виробництва системи. Звернемо увагу, що сама система ще не випробувана, рішення стосовно її виробництва ще може бути не прийнято, а фахівці підприємства – потенційного майбутнього

виробника системи, як правило, починають роботи із підготовки свого виробництва до серійного випуску системи. До неї входять такі основні види дій:

- оцінка можливостей використання технологічного оснащення, розробленого для дослідного виробництва;
- визначення недостатнього технологічного оснащення та устаткування, яке належить розробити, виготовити або замовити;
- уточнення складу недостатнього для виробництва системи технологічного устаткування, роботи із підготовки до його замовлення, виготовлення та запуску;
- уточнення планів пуско-налагоджувальних та інфраструктурних робіт, які потрібно виконати;
- уточнення постачальників матеріалів, напівфабрикатів, визначення логістичних ланцюжків постачання;
- підготовки плану розгортання серійного виробництва системи.

Залежно від цілої низки обставин, ці роботи тією чи іншою мірою, у повному обсягу можуть бути виконані на стадії розробки. Можливо, що вони можуть здійснюватися зі стадії виробництва, після формального рішення щодо запуску системи у виробництво. У першому випадку буде економія часу на організацію виробництва, а у другому - знижуються ризики безповоротних втрат майбутнього виробника системи, якщо буде прийнято негативне рішення щодо виробництва системи. Роль системного інженера у пошуку балансу інтересів між розробником та виробником системи також істотна.

• Організація та технологія виробництва

Виробництво складної інженерної системи саме по собі є суперскладною або інженерно насиченою «S»-системою. Для організації її виробництва належить забезпечити ефективну участь у процесі багатьох субпідрядників: розробників та виробників нових підсистем, компонентів, нестандартних напівфабрикатів матеріалів та технологій, постачальників стандартних підсистем, компонентів, технологій, матеріалів та напівфабрикатів. Потрібно скоординувати їх дії, забезпечити необхідним фінансовим та договірним ресурсом заради однієї мети – створити та виготовити систему, яка має цінність для споживача (рис. 5.4).

Зазначимо, що розробка системи, її виробництво та постачання може бути локалізовано: як в одному господарському комплексі, так і у декількох. Юридичні особи розробників та виробників найчастіше розділені.

У наведеному рисунку 5.4 дуже спрощено пунктиром показані зв'язки, що виникають між основними учасниками створення системи. Організація ефективної взаємодії між ними є одним із найважливіших завдань системних інженерів. Важливим інструментом цього є розроблення та реалізація різноманітних регламентів, нормативів виробітку, узгодження рішень зацікавлених осіб процесу організації виробництва. З цією метою генпідрядник системи ініціює розроблення вимог до постачальників та субпідрядників, у яких регламентує основні процедури, такі, наприклад, як:

- комунікації між учасниками програми;
- моніторинг та контроль робіт;
- управління ризиками;

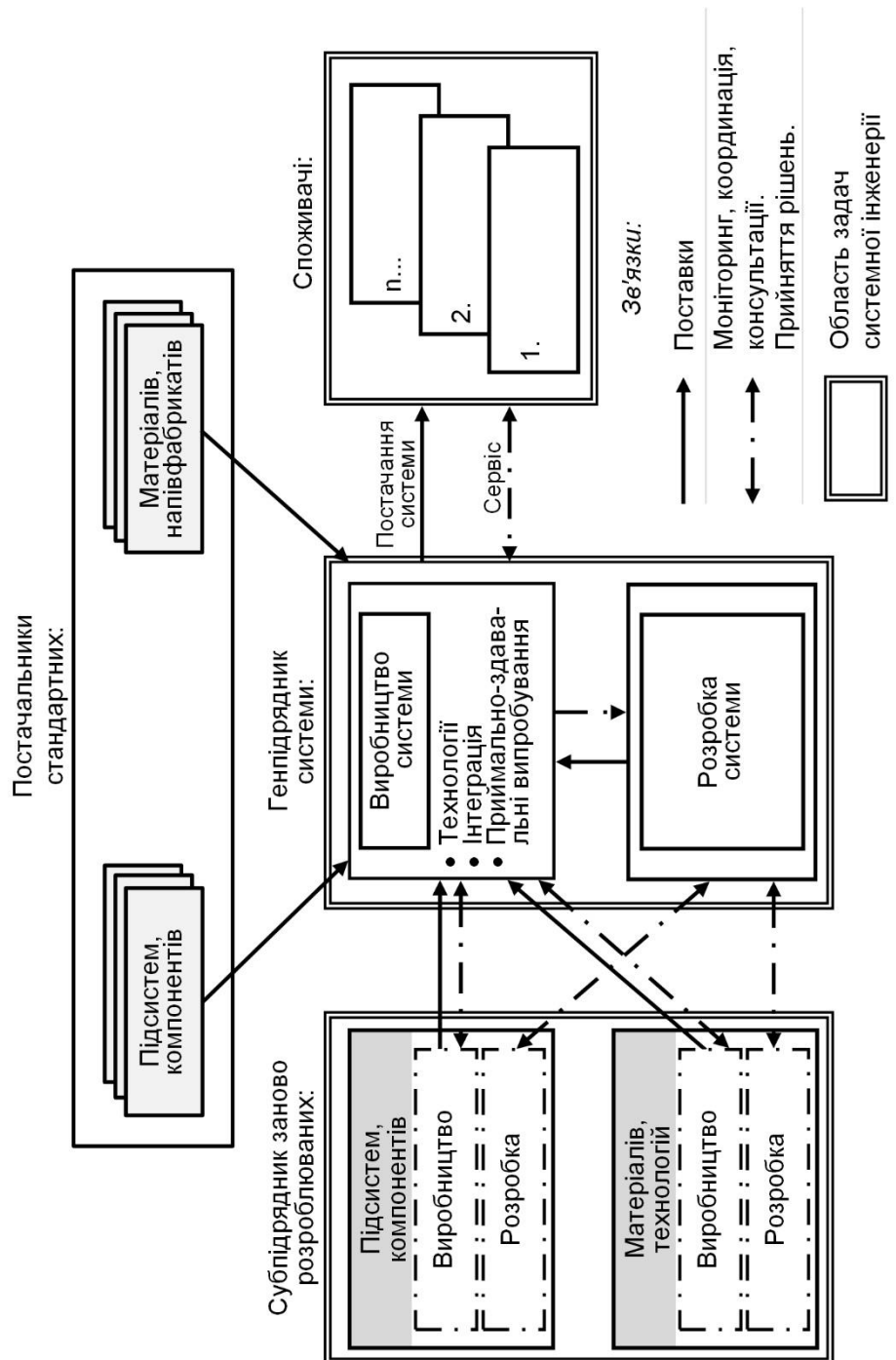


Рис. 5.4. Взаємодія основних учасників в інженерно-насиченій системі виробництва.

- управління значними виробничими змінами;
- передача робіт іншим виконавцям та цілої низки інших.

На окрему увагу заслуговують регламенти, які стосуються дій постачальників і субпідрядників щодо взаємодії із генпідрядником у процесі проєктування та розроблення системи, визначення її конфігурації.

Приклад. Як типовий приклад цих вимог наведемо таке: «Постачальник має працювати відповідно до правил управління конфігурацією Замовника, методами, процесами та інструментами управління конфігурацією для досягнення організацією завдань проєктування та виробництва, затверджених Замовником»; «Постачальник має дотримуватися всіх принципів управління конфігурацією Замовника та брати участь у роботі Спеціального Комітету Замовника (Виписка з «Типових зведених вимог до постачальників у рамках програм цивільної авіаційної техніки»).

Значна роль системних інженерів під час освоєння технологічних процесів, здійснюваних у процесі серійного виробництва у генпідрядника. Основна увага зазвичай фокусується на наступних двох найважливіших аспектах.

По-перше, під час створення дослідного зразка системи певна частина технологічних процесів була ще достатньо відпрацьована і піддавалася корекціям, що очевидно, має наслідками необхідність прийняття управлінських і технічних рішень у ході допуску цих процесів до серійного виробництва. Аналогічне стосується і низки матеріалів та напівфабрикатів, які використовуються тимчасово для будівництва дослідного зразка системи.

По-друге, необхідно відстежувати, аби у гонитві за забезпеченням показників ефективності серійного виробництва не було принесено у жертву або не постраждала функціональність системи.

Організаційно ці та подібні до них питання прийнято вирішувати створенням спеціальної структури – філії розробника системи на серійному виробництві. Особливо це важливо, якщо воно територіально віддалено від розробника системи. Керівник такого підрозділу зазвичай наділяється високими повноваженнями і виконує багато функцій системного інженера системи.

У вітчизняній практиці на етапі «Виробництво» прийнято розділяти поняття «Поставлення системи на виробництво» та «Усталене виробництво». У свою чергу, підетап «Поставлення системи на виробництво» у свою чергу поділяється на два: підготовки та освоєння виробництва (ДСТУ В-П 15.004:2019, [41]) у ході яких рекомендується виконувати певний набір процесів (табл. 5.1).

• **Приймальні випробування системи**

Фінальним актом виробництва є засвідчення того, що виготовлена система відповідає вимогам остаточно відкоригованої конструкторсько-технологічної документації, система якості виробника знаходиться на належному рівні та відповідає встановленим регламентам, а продукція, тобто система, відповідає заданим вимогам і може бути прийнята до експлуатації.

Цій процедурі передують проведення випробувань, які називаються приймальними [6], у вітчизняній практиці: контрольними випробуваннями (приймально-здавальними, пред'явницькими) (ДСТУ В-П 15.004:2019, [41]).

Таблиця 5.1. Основні етапи процесу «виробництво» [41].

1. «Виробництво»	
1.1 Поставлення на виробництво виробу ОВТ	Підготовлення та освоєння виробництва заданого виду
	Освоєння виробництва та поставлення на виробництво матеріалу (матеріалів)
1.2 Усталене виробництво виробу ОВТ	Виробництво виробу ОВТ у визначеному обсязі випуску
	Випробування і приймання виробів ОВТ, що випускають
1.3 Постачання виробів ОВТ	Відправлення (відвантаження) виробів ОВТ замовнику (споживачеві)
	Транспортування виробів ОВТ
	Відвантаження виробів ОВТ замовнику (споживачеві)
1.4 Зняття виробу ОВТ з виробництва	Обґрунтування доцільності, підготування та затвердження документів про зняття виробу ОВТ з виробництва. Визначення порядку подальшого зберігання РКД, ТУ, ТД та засобів технологічного оснащення для відновлення виробництва виробу ОВТ
	Визначення потреб у подальшому виробництві складових частин, ЗІП та закупівлі комплектувальних виробів для підтримування виробів ОВТ, що залишились у використанні (в експлуатаванні)
	Визначення порядку забезпечення складовими частинами (комплектувальними виробами) та ЗІП виробів ОВТ, які зняті з виробництва, але перебувають у використанні (в експлуатаванні)

Примітка. Вхідними критеріями стадії «виробництво» можуть бути наявність РКД та ТД, підготованого персоналу, фінансових та інших ресурсів, необхідних для виробництва виробу ОВТ у заданому обсязі випуску.

Критерієм виходу зі стадії «виробництво» може бути узгоджена позиція заінтересованих сторін щодо досягнутих показників якості та ефективності серійно вироблених виробів ОВТ та доцільності продовження його серійного виробництва.

Формування складу процедур-регламентів, черговості, набору методик та інструментів приймальних випробувань є досить складним завданням і це завдання так само входить до компетенції системного інженера. Саме експертна оцінка системного інженера дуже важлива для визначення складу та змісту випробувань.

Для складних та оборонних систем їх приймання здійснюється у присутності замовника.

5.3 Етап експлуатації та супроводу системи

На перший погляд функція системного інженера на цьому етапі мало затребувана (рис. 5.5). Насправді, особливо для складних систем, це далеко не так. Досвід свідчить, що освоєння складних систем в експлуатації майже завжди, особливо на ранніх кроках експлуатації, вимагає постійної, а під час і особистої участі системного інженера. Оператори, які навіть пройшли навчання на імітаторах, стендах, все одно в реальній ситуаціях можуть поводитися не як фахові випробувачі системи, наприклад, льотчики. В результаті після аналізу зауважень, можливо, знадобиться корекція конструкції системи або технології виробництва. Деякі компоненти, підсистеми, за не дуже вмілого поводження з боку виробників, можуть виходити із ладу. Потрібно або посилювати контроль підготовки персоналу або вводити корекції у систему, або те й інше разом.

Далі починається «рутинна» робота зі штатної експлуатації системи, де функції системних інженерів зводяться до моніторингу та супроводу в експлуатації. Здавалося б, це має більше цікавити виробників. Проте лише за масової експлуатації часто виявляються недоліки, дефекти, які вимагають поточного усунення, для цього необхідні спільні зусилля розробника і виробника. Крім того, накопичений фактичний матеріал, отриманий із відгуків споживачів, може стати частиною вихідних даних для подальшої модернізації системи.

Під час модернізації роль і задачі участі системного інженера знову дуже великі, особливо із огляду на те, що складні і довгостроково експлуатовані системи піддаються модернізації часом багаторазово. Морські судна, літаки, атомні станції та багато інших систем експлуатуються 30-70 років, іноді й більше, зазнаючи постійної системної модернізації. На рисунку 5.6 схематично-умовно показаний ступінь участі різних суб'єктів у забезпеченні підтримки системи в експлуатації.

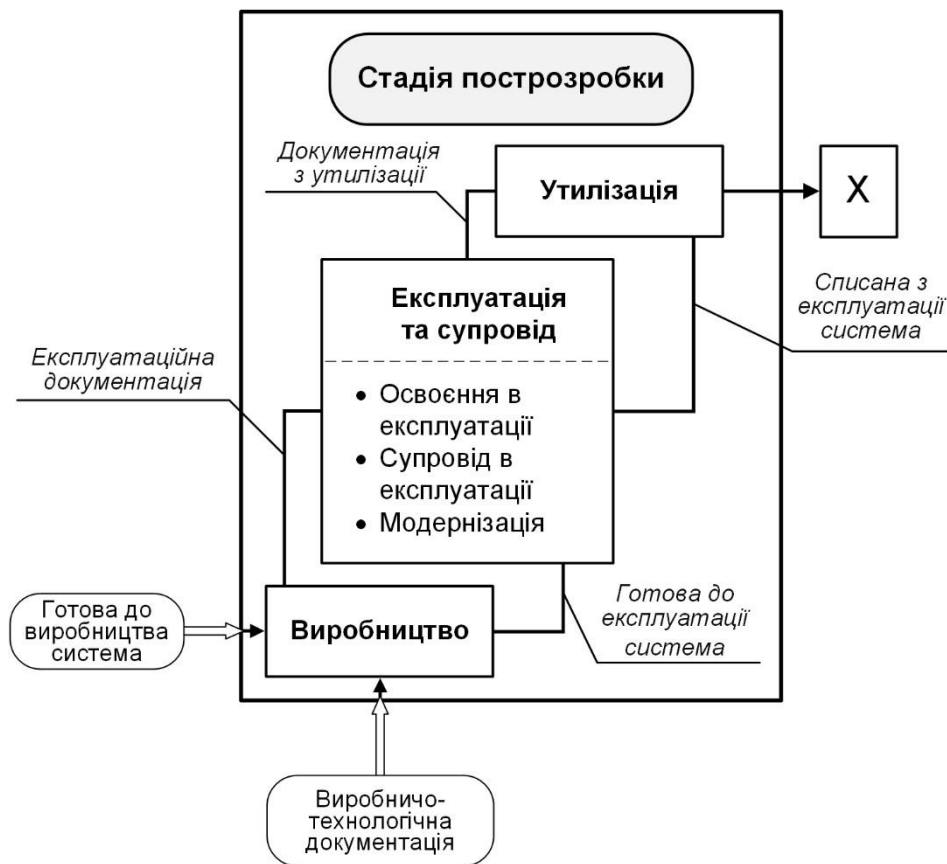


Рис. 5.5. Стадія построзробки: етап експлуатація та супровід.

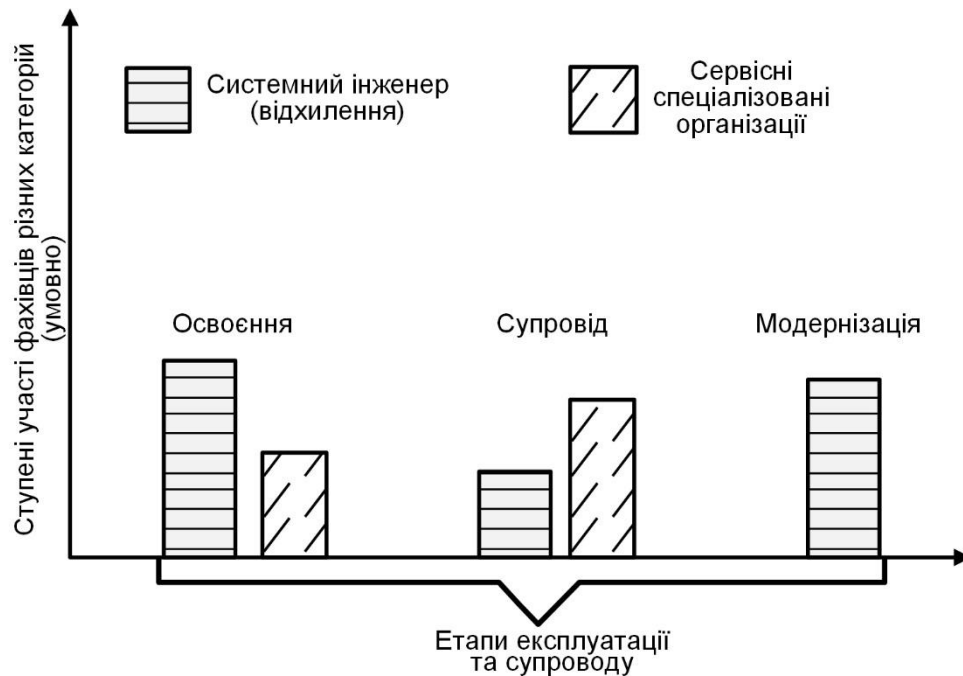


Рис 5.6. Підтримка системи експлуатації.

• Освоєння в експлуатації

Загальноприйнято вважати, що складності на етапі освоєння системи, введення її в штатну експлуатацію залежать від двох основних факторів [6]. По-перше, це якість системи, що поставляється, яка визначається, як підприємством-постачальником, так, часто, і постачальниками підсистем та компонентів. По-друге, це умови вбудовування системи у середовище її експлуатації, які включають і кількість, і тип інтерфейсів, і готовність інфраструктури до експлуатації, а також, що дуже важливо, людський фактор у всіх його проявах.

Залежно від типів систем вплив цих факторів на освоєння системи в експлуатації різний. Так для таких систем, які інтегруються в єдину систему на підприємстві генпідрядника,

наприклад, літака, БПЛА, ракети зі складною системою управління та подібні до них, всі основні нестиковки, можливі відмови в роботі виявляються та усуваються під час заводських випробувань. Там же, за необхідності, виконують заміну дефектних компонентів. Тому під час освоєння в експлуатації найчастіше основні ризики позаштатної поведінки системи визначаються людським фактором.

Навпаки, для великомасштабних систем, типу сучасних суден, плавучих платформ, систем стеження за космічними об'єктами та інших їм подібним, інтеграція їх здійснюється безпосередньо у доку, на місцевості, тобто на місці експлуатації. Тому дефекти підсистем та компонентів виявляються у процесі інтеграції, практично під час освоєння в експлуатації, і тут особливо велике значення координуючих, експертних зусиль системних інженерів.

У таких системах поява та виявлення проблем є не винятком, а даністю. Враховуючи унікальність подібних систем, їх одиничність, виявлені проблеми усувати доводиться також щоразу по-своєму. Зазвичай потрібне спеціальне вимірювальне та випробувальне устаткування, присутність та участь фахівців від субпідрядників, знання особливостей всієї системи загалом. Об'єднання різних ролей, різних категорій спеціалістів на вирішення єдиної задачі є прерогативою системного інженера.

• Супровід в експлуатації

Чимало складних систем експлуатуються із певними інтервалами. Як правило, перед введенням їх в експлуатацію після планового або вимушеного простою потрібна перевірка готовності здатності забезпечити задані функції.

У ході експлуатації заздалегідь регламентуються періодичні перевірки та заміни окремих фізичних середовищ, агрегатів та компонентів.

У процесі експлуатації у програмно-насичених системах повсюдно відбуваються збої та відхилення від заводських параметрів. Як правило, це є наслідком багатьох факторів, у тому числі об'єктивних властивостей програмної побудови – складністю взаємодії програмних модулів, нечіткістю сполучення різних програмних засобів, не урахуванням помилок і корекцій у програмному описі тощо.

Оскільки у розробленні програмного забезпечення беруть участь різні групи розробників зі своїми традиційними підходами до використання специфічних програмних засобів, тому питання ув'язування та сумісності їх стає першочерговим. У координації та налагодженні взаємодії між цими групами програмних фахівців важлива роль системних інженерів. Що вони можуть протиставити цим об'єктивним проблемам? Здебільшого – знання сутності проблем, повсюдне забезпечення валідації змін, які вносяться у програмне забезпечення, та перевірку їх на стендах та випробувальному устаткуванні.

Окремі особливості має обслуговування систем у польових умовах. Як правило, можливостей для всебічного аналізу стану системи та наявних відхилень на такому місці експлуатації немає або вони обмежені. Найчастіше такі процедури виконуються віддалено. Зібрана інформація передається розробнику, піддається аналізу та вироблені рішення повертаються в експлуатацію для реалізації.

Для систем, розрахованих на багаторічну експлуатацію, періодично можуть відбуватися аварійні ситуації. У їх оцінці,

аналізі, у виробленні рішень щодо усунення аварій обов'язково передбачається участь системних інженерів – представників розробника системи.

• Модернізація

Як вже неодноразово зазначалося, термін експлуатації складних інженерних систем найчастіше буває досить тривалим. Так, авіанесучі кораблі, космічні системи, літаки, багато систем озброєнь розраховані на багато десятиліть експлуатації, нерідко, 50 та більше років. Мотивацією до їх розроблення, як ми це раніше розглядали, на момент старту програм були потреби зовнішнього середовища або технологічні можливості, що знову відкрилися, або обидва ці фактори. Очевидно, що за час експлуатації із розвитком прогресу змінюються технологічні можливості, також змінюються потреби. Фахівці звернули увагу, що не всі типи підсистем та компонентів старіють одночасно. Так, наприклад, планер та основні несучі елементи літака, корпус та силові конструкції корабля, шасі та корпус самохідної зенітної установки старіють, втрачають свою функціональність повільніше, ніж електронні, програмні, оптичні компоненти системи.

Наведені обставини зумовлюють можливість, не виводячи всю систему із обігу, замінювати у ній деякі підсистеми та компоненти, зберігаючи та розвиваючи її функціональність, продовжуючи її життєвий цикл. Такі дії називаються модернізацією системи. Зазначимо, що для складних інженерних систем модернізація може здійснюватися декілька разів.

У чому полягають основні особливості сучасних підходів до модернізації складних інженерних систем?

По-перше, модернізацію системи зручно розглядати із позиції новоствореної системи – із нуля. Також передбачають етапи оцінки та вибору концепції, стадій розробки, промислової реалізації та обов'язково на всіх точках прийняття рішень – випробування та валідацію.

По-друге, для таких систем все частіше застосовують так звану стратегію запланованого покращення системи. Сутність цієї стратегії у тому, що майбутня модернізація передбачається ще на стадії розробки системи, в ній передбачаються компоненти та підсистеми, які підлягають надалі розвитку та заміні, розробляється відповідний план модернізації [6]. При цьому намагаються передбачити мінімальні зміни у конфігурації системи загалом. З найбільш типових прикладів це проектування літака із урахуванням заміни двигунів, подовженням фюзеляжу, трансформація його із цивільного в транспортний або змішану версії. Роль системних інженерів істотна, як під час початкового планування майбутнього покращення, і тут вона очевидна, так і в умовах реалізації цих планів під час модернізації виробу. Слід зазначити, що якщо модернізацію здійснює розробник системи, тоді ці процеси проходять простіше через наявність всеосяжної бази знань стосовно системі, комплектності документації та досвіду її розроблення, освоєння та супроводу. Якщо модернізацію здійснює новий розробник, тоді витрати на її здійснення, природні ризики помилкових рішень виявляються значно вищими.

Одним із типових напрямків модернізації є використання нового програмного забезпечення системи. З одного боку, фізично це легше здійснювати оскільки не доводиться демонтувати компоненти, які модернізуються, відпрацьовувати інтерфейси, але з іншого боку заміна програмного продукту вимагає особливої уваги з боку системних інженерів і несе за собою специфічні ризики. Щоб їх мінімізувати, необхідно враховувати наступні обставини [6]:

- Перша – невелика зміна у програмному забезпеченні все одно вимагає перевірки, відпрацювання, урахування в документації.
- Друга – нові програмні продукти погано адаптовані до використання застарілих мов програмування. Компілятори-транслятори цих продуктів на сучасні програмні мови можуть бути відсутніми, в результаті знадобляться великі трудовитрати на нове відтворення програмного продукту.
- Третя – витрати на тестування нового програмного продукту можуть бути значними.
- Четверта – потрібний документований облік нового програмного забезпечення в базі даних конфігурації системи оновлення документації із експлуатації та технічного обслуговування.

5.4 Етап утилізації системи

Під утилізацією системи прийнято розуміти комплекс організаційно-технічних, економічних, екологічних та інших заходів і процесів, які забезпечують декомпозицію та перероблення вилученої із експлуатації чи зберігання системи.

Процес утилізації зазвичай складається із демонтажу та поділу системи на окремі компоненти, деталі. Після цього належить сортування компонентів, деталей на три групи:

- ті, які можуть бути використані повторно у тому ж стані на виробництві, експлуатації та ремонті;
- ті, які підлягають переробці – рециклінгу;
- ті, які становлять екологічну небезпеку і мають бути поховані за дотриманням відповідних стандартів або знищені.

Сучасний підхід системної інженерії полягає в тому, що етап утилізації має бути заданий у технічному завданні на розробку системи – це по суті стадія «передрозробки», а реалізований у достатньому обсязі на стадії «розробки» – етапі розроблення конструкторсько-технологічної документації, тобто етапі «Технічний проєкт».

У вітчизняній нормативній документації – ДСТУ В-П 15.004:2019 [41], який регламентує стадії життєвого циклу озброєння та військової техніки, передбачено дещо інше тлумачення поняття «утилізація». У цьому стандарті останнім підетапом життєвого циклу є «Вилучення» – вилучення, яке охоплює чотири фази та утилізація є завершальною (табл. 5.2).

Раніше неодноразово зазначалося, що часово-послідовне подання стадій та етапів життєвого циклу системи є умовним і не відповідає логіці її розвитку (рис. 5.7).

Тому не варто дивуватися, що багато дій, груп процесів і процедур, які відносяться до етапу утилізації, здійснюються на попередніх стадіях і етапах розвитку системи. Лише група процесів моніторингу та корекції документації виконується безпосередньо під час утилізації системи.

Таблиця 5.2. Основні етапи процесу «вилучення» – ДСТУ В-П 15.004:2019 [41].

Вилучення:	
Підетап	Смугність процесів послідовного змінення стану вибору ОВТ
6.1 Списання виробу ОВТ	Охоплює такі організаційні заходи: а) прийняття рішення щодо списання виробу ОВТ та подальшого використання його складових частин; б) створення споживачем комісії для визначення технічного стану та списання виробу ОВТ; в) документальне оформлення вилучення виробу ОВТ з обліку: оформлення актів списання (технічного стану), визначення категорій виробу ОВТ загалом та його складових частин; г) аналіз змінення характеристик, класифікація недоліків, відхилень, дефектів та відмов виробу ОВТ за час його використання; д) прийняття рішення щодо системи підтримки виробу ОВТ (списання або продовження використання для підтримування інших виробів ОВТ).
6.2 Розбирання виробу ОВТ	Охоплює такі організаційні та технічні заходи: а) демонтування (або розбирання) виробу ОВТ на місці використання (експлуатування), транспортування його (або його складових частин) до місця перероблення, передавання його (їх) для перероблення; б) переведення виробу ОВТ (його складових частин) у стан для подальшого використання в навчальних цілях; в) розбирання виробу ОВТ (його складових частин) у місці перероблення, визначення складових частин, складаних одиниць, деталей, які може бути використано в майбутньому; г) прийняття рішення щодо демілітаризації чи ліквідації виробу ОВТ, його складових частин.
6.3 Демілітаризація виробу ОВТ	Ужиття заходів, які унеможливають використання виробу ОВТ та його складових частин за призначенням: а) змінення конфігурації виробу ОВТ, його складових частин так, щоб унеможливити його (їх) використання за призначенням, завдання шкоди персоналу, навколишньому середовищу; б) зняття та вилучення складових частин виробу ОВТ, відсутність яких унеможливило використання виробу ОВТ за призначенням; в) виконання вимог міжнародних угод щодо роззброєння, скорочення та/чи ліквідації певних видів ОВТ.
6.4 Ліквідація (утилізація (знищення, захоронення) виробу ОВТ та системи його підтримки («забезпечувальної системи»))	Ужиття заходів щодо ліквідації виробу ОВТ: а) визначенням організацій, яка проведитиме ліквідацію виробу ОВТ, укладання угоди щодо ліквідації виробу ОВТ; б) підготуванням або залученням персоналу до проведення ліквідації виробу ОВТ; в) утилізацією виробу ОВТ — переробленням непридатних складових частин та матеріалів, отриманих після розбирання виробу ОВТ, для подальшого використання як вторинної сировини (продукції); г) знищенням виробу ОВТ — поділенням його (або його складових частин) на частини або іншою визначеною дією, спрямованою на змінення його геометричної форми, фізичної структури, хімічного складу тощо з забезпеченням безпеки персоналу й навколишнього середовища; д) захороненням виробу ОВТ — видаленням його в певні сховища, що не передбачає його повторного використання; ж) виконанням вимог міжнародних угод щодо роззброєння, скорочення та/чи ліквідації певних видів ОВТ



Рис. 5.7. Стадія построзробки: етап утилізація.

Стисло розглянемо основні групи процесів, що забезпечують сучасні вимоги до утилізації системи.

- **Усвідомлення актуальності проблеми утилізації**

Одним із наслідків прискорення темпів науково-технічного прогресу є, як це не дивно, накопичення виведених із експлуатації різноманітних складних інженерних систем. Якщо

звернути увагу на технічні стоянки старих кораблів, у тому числі військових, місця зберігання списаної військової техніки, то можна переконатися, що кількість цих об'єктів постійно зростає.

Приклад. З роботи [76]: на світовому ринку, згідно з прогнозами компанії Airbus, на період із 2009 до 2028 року буде відправлено на списання 8453 одиниць повітряних суден. На підставі звіту компанії Boeing потенційний ринок для утилізації літаків складатиме близько 6000 одиниць. За даними агентства ICF International з 1990 по 1999 рр., щорічно списувалося у середньому 170 комерційних авіалайнерів. У наступне десятиліття ця кількість збільшилася до 400 повітряних суден на рік, до 2023 р. за прогнозами у середньому 750 літаків списуватимуться щорічно, у перспективі – до 1000 [77].

На авіабазі ВПС США «Девіс-Монтен» (рис. 5.8) зберігається на консервації, ймовірно, найбільший парк авіатехніки у світі – понад 4400 одиниць, там же складовано і сорок космічних кораблів. Близько 700 одиниць із загальної кількості це винищувачі McDonnell Douglas F-4 Phantom II (рис. 5.9).

Щорічно на базу надходить близько 400 од. воєнної техніки. Сьогодні площа полігону перевищує 10 км², а сумарна вартість майна авіабази перевищує тридцять п'ять мільярдів доларів [78-80].

Очевидно, що проблема ефективної утилізації морально або фізично застарілих систем, які відпрацювали свій ресурс, є надзвичайно актуальною і вимагає до себе особливої уваги. Необхідно зазначити, що регламентація включення до життєвого циклу систем заключного етапу утилізації з'явилася відносно недавно - останні 20-25 років. Тому багато систем, які сьогодні знаходяться в експлуатації, не мають документованих процедур їх утилізації, що природно ускладнює цей важливий підетап життєвого циклу.



Рис. 5.8. Авіабаза ВПС США «Девіс-Монтен» розташована в межах міста Тусон, штат Арізона [81].



Рис. 5.9. Винищувачі «McDonnell Douglas F-4 Phantom II» на авіабазі ВПС Арізона, США «Девіс-Монтен» [82].

- **Планування утилізації**

Для систем, розроблених порівняно недавно, а також для систем, що розробляються в даний час, етап утилізації рекомендується починати планувати якомога раніше. Так, у російському стандарті [24] планування процесів утилізації рекомендовано розпочинати одночасно із початком серійного виробництва.

Водночас, фахівці визнають, що окремі процедури, пов'язані із майбутньою утилізацією, необхідно здійснювати ще раніше. В тому ж стандарті згадується, що ще на етапі розроблення дослідно-конструкторської документації мають бути реалізовані вимоги щодо використання схемних конструктивних рішень, спрямованих на підвищення ефективності утилізації. На рисунку 5.10 дуже наочно проявляється невідповідність часового та логічного подання етапів життєвого циклу у формі лінійної діаграми. На діаграмі початок етапу утилізації збігається із початком серійного виробництва системи. Але щоб мати документарне оформлення процесів утилізації, мати розроблені технологічні процеси, здійснювати прогнозоване планування утилізації, розпочинати роботи доводиться ще із стадії розроблення технічного завдання на систему.

Таким чином, окремі концептуальні питання утилізації мають перебувати у фокусі уваги системного інженера з етапу 2 (рис. 5.10) «запуску програми», тобто із стадії «передрозробки».

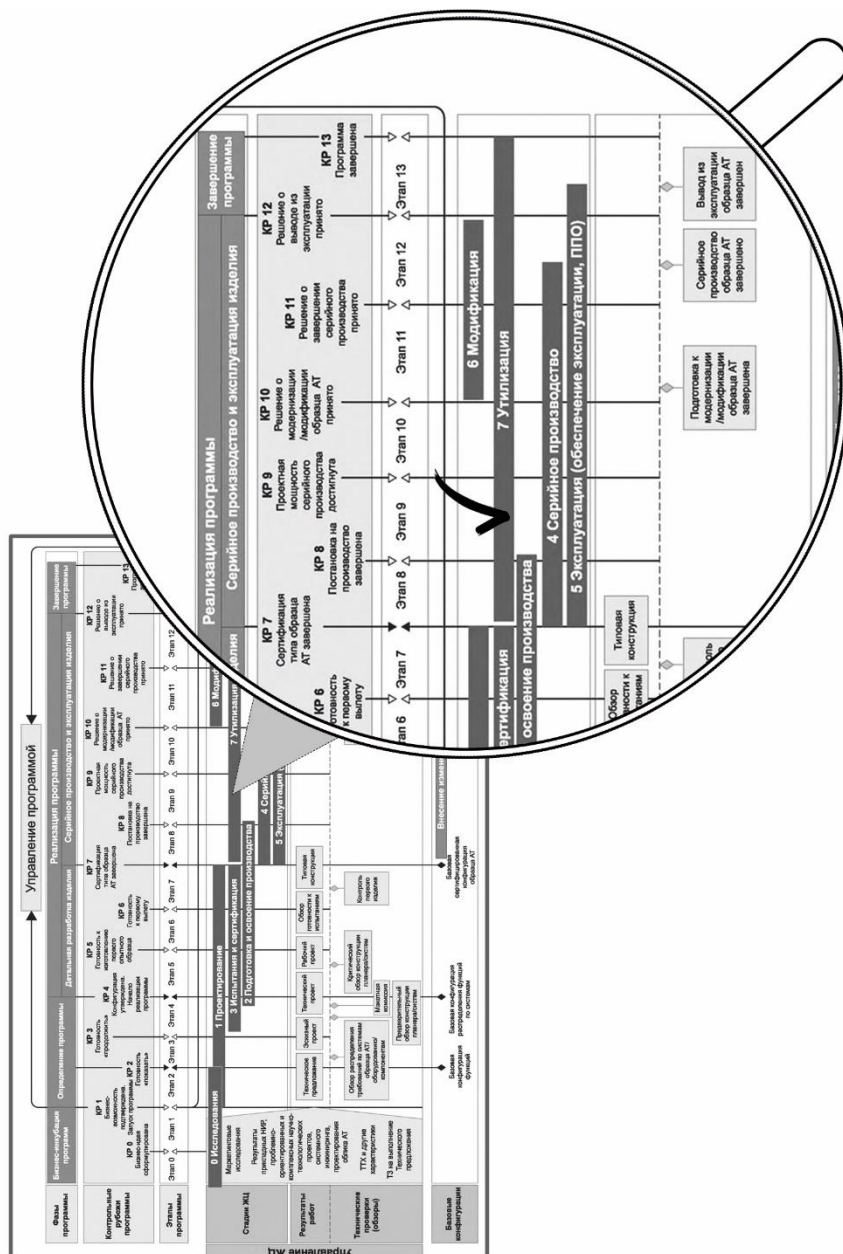


Рис 5.10. Фрагмент жизненного цикла авиационной системы, який ілюструє раннє планування робіт із утилізації – ГОСТ Р 58849-2020 [24].

Для раніше розроблених систем, планування та розроблення процесів утилізації доводиться робити «навздогін», тобто у міру їх накопичення та прийняття рішення щодо виведення з обігу. Це особливо не просто для систем озброєння та військової техніки, майна, що належить до державної власності. І тут спочатку доводиться обґрунтовувати, готувати і оформляти правові нормативні документи, зазвичай узгоджуючи їх із низкою центральних державних відомств. Потім слідує розроблення організаційно-технічних заходів щодо утилізації і лише потім можна розпочинати процес утилізації.

• Виконання процесів утилізації

Сучасний підхід до процесу утилізації полягає в тому, що на стадії розроблення конструкторсько-технологічної документації до неї повинні бути включені дані, які містять такі основні відомості:

- дані про масу системи та її підсистем, компонентів із зазначенням матеріалів, з яких вони виготовлені;
- переліки елементів та деталей, що містять дорогоцінні та інші дефіцитні матеріали;
- переліки вибухонебезпечних, радіоактивних, отруйних, ядерних матеріалів, речовин та рекомендацій щодо їх знешкодження та заходів дотримання техніки безпеки під час роботи з ними;
- переліки з'єднань вузлів та агрегатів, а також рекомендовані технологічні процеси щодо їх декомпозиції та транспортування.

Розробником повинна бути розроблена принципова схема технологічного процесу утилізації системи, що містить, крім іншого, такі відомості:

- загальні принципи та структуру всього циклу утилізації;
- типовий склад технологічних ліній з утилізації, а також номенклатуру, основні технічні характеристики, склад устаткування, що використовується для цих цілей;
- рішення щодо вилучення, знешкодження та знищення—нейтралізації вибухонебезпечних, отруйних, радіоактивних виробів та матеріалів;
- рекомендації щодо вилучення, збирання та перероблення дорогоцінних та гостродефіцитних матеріалів;
- вимоги та вказівки щодо забезпечення екологічної безпеки процесів [24].

У сучасному національному стандарті, який стосується життєвого циклу системи озброєної та військової техніки — ДСТУ В-П 15.004:2019 [41], як це представлено в раніше наведеній таблиці 5.2, власне утилізація (ліквідація) є одним із чотирьох процесів, що відносяться до етапу «Вилучення»; перші три процеси стосуються правової регламентації процесу списання та «Вилучення»:

- Списання виробу озброєння та військової техніки (ОВТ).
- Розбирання виробу ОВТ.
- Демілітаризація виробу ОВТ.

Хто, як і коли розробляє основні матеріали, необхідних ефективної реалізації процесів утилізації цим стандартом не передбачається.

Очевидно, що на сучасному етапі, фахівцям, які займаються утилізацією, частіше доводиться розробляти та формувати

документацію із утилізації систем самостійно, оскільки розробником системи це не було зроблено.

• Тенденції щодо утилізації авіатехніки

Ключовою тенденцією в розвитку процесів утилізації авіатехніки є спеціалізація, яка все більш зримо проявляється. Зростає кількість організацій, для котрих утилізація є основним видом діяльності.

В останні десятиліття експлуатантами системи багато що робиться аби підвищити ефективність їх роботи. Пов'язано це переважно з тим, що вартість складних інженерних систем динамічно зростає з кожним роком. Для авіаційних систем цей показник зростання становить у середньому 5 та більше відсотків. Одним із важливих шляхів підвищення ефективності їх використання є розширення повторного використання підсистем та компонентів. Наведемо характерні приклади із галузі авіабудування.

Приклад. З роботи [76]: в авіабудуванні світовим лідером у сфері поводження із авіаційними транспортними засобами, що виведені з експлуатації, є Асоціація з утилізації парку повітряних суден (Aircraft Fleet Recycling Association, AFRA). До AFRA входять провідні європейські компанії та заокеанські корпорації, серед яких Boeing , Bombardier, Embraer, Rolls-Royce та інші.

Розташований у французькому місті Шатору, центр AFRA працює над тим, щоб підвищити ефективність діяльності авіаційної галузі за рахунок демонтажу літальних апаратів екологічно безпечним та економічно вигідним способом.

Важливим завданням AFRA є здійснення демонтажу підсистем та компонентів (шасі, двигуна, допоміжної силової установки, систем життєзабезпечення), перевірка їх, атестація та введення в повторний обіг для заміни на повітряних суднах (ПС).

У Китаї будується завод, у який інвестували близько 2 млрд. дол. США, здатний провести роботи із утилізації 50 одиниць ПС на рік [83].

Спеціалізація стосується не лише концентрації процесів і технічних робіт із утилізації ПС у спеціалізованих компаніях, а й в організації управління так званими пулами компонентів і підсистем авіатехніки, які повторно використовуються. Тут спостерігаються дві основні тенденції:

- По-перше, перевізники під час замін та ремонтів починають все більше віддавати перевагу компонентам, придбаним на вторинному ринку.
- По-друге, авіаперевізники скорочують свої запаси запчастин, віддаючи перевагу спеціалізованим компаніям, завданням яких є підтримка в актуальному стані запасів вторинно-використовуваних ремонтних компонентів та підсистем для ПС.

Приклад. З роботи [76]: важливим гравцем на вторинному ринку авіазапчастин є компанія International Aircraft Associates (IAA) – це один із найбільших дистриб'юторів компонентів для авіадвигунів. У разі потреби перевізники та ремонтні підприємства все частіше звертаються до вторинного ринку у пошуках запчастин для таких силових установок, як CFM56-7B, оскільки не вважають за можливе утримувати власний запас подібних компонентів.

Американський низькотарифний авіаперевізнак Southwest Airlines зараз використовує свій запас компонентів набагато ефективніше, ніж раніше. На початок листопада 2012 року ця авіакомпанія була найбільшим у світі експлуатантом літаків Boeing-737-700 з парком в 424 одиниці. Після ретельного відсортування запасів запчастин вдалося скоротити його на 10-15%. У перспективі запаси компонентів, що зберігаються в авіакомпанії, планується скоротити ще радикальніше.

За останні 5-7 років прагнення авіаперевізників запитися запчастинами пішло на спад, оскільки стало очевидним, що використання послуг спеціалізованих постачальників є ефективним і економічним рішенням.

Перспектива економічної вигоди від більш ефективного використання авіаційних компонентів призводить до скорочення бюджетів на придбання запчастин. Деталі, зняті із розібраних екземплярів нових типів ПС, стають дешевшими, вартість нещодавно розібраних на запчастини компонентів ПС, знизилася на 10-20%.

Зростання пропозицій на ринку авіаперевезень нових високоефективних ПС, таких як Airbus-A320neo, Boeing-737MAX, є стимулюючим фактором для виведення із експлуатації застарілих моделей і продажу їх для подальшого розбирання на запчастини.

Приклад. З роботи [76]: так Airbus-A319 був проданий колишнім експлуатантом на запчастини за 14 млн. дол. США, тоді як за весь літак пропонували не більше 12 млн. дол. США. Основним фактором тут є окупність інвестицій. Якщо власник може отримати на 2 млн. дол. США більше, продавши ПС частинами, то рік випуску літака не грає ролі.

У питаннях вторинного використання авіазапчастин значною мірою проявляється роль системних інженерів. Національна авіаційна влада по-різному регулює авіаційну діяльність, проте скрізь тією чи іншою мірою регламентується порядок перевірок, сертифікації компонентів із метою повторного використання, контролю за діяльністю учасників процедур сертифікації. До багатьох із цих процедур залучаються системні інженери – розробники системи.

Більш складною з технологічної та економічної точки зору є проблема вилучення та переробки конструкційних матеріалів. За оцінками фахівців до 2030 року підлягають заміні близько 35 тис. ПС. З огляду на те, що у середньому в літаку використовується близько 50 тон конструкційних матеріалів, очевидна велика потреба авіабудування у високоякісних, дорогих конструкційних матеріалах із алюмінієвих, титанових, магнієвих, берилієвих та інших сплавів, високоміцних сталей,

композиційних матеріалів [77]. Таким чином, завдання розроблення ефективних організаційно-технічних моделей обігу матеріалів у середі авіаційної діяльності є надзвичайно актуальним.

На думку фахівців із вторинної переробки конструкційних матеріалів, утилізація ПС у відриві від їхнього розроблення є економічно неспроможною. Занадто великі, непродуктивні витрати на логістику, технічне оснащення, сортування та вторинну переробку. Як раніше зазначалося, одним із шляхів вирішення цієї проблеми є створення спеціалізованих виробництв із утилізації ПС, а другий шлях, це формування замкнених процесів рециклінгу, у яких безпосередньо беруть участь металургійні підприємства.

Приклад. З роботи [76]: авіабудівний концерн Boeing та корпорація Alcoa (американська металургійна компанія) сформували замкнуту програму із розширення авіарециклінгу брухту алюмінієвих сплавів, які використовуються у виробництві літаків. Її втілення спричинить інтермодальні перевезення відходів із підприємств Boeing у Франції та сторонніх постачальників на завод Lafayette (США) для подальшої переробки.

Програма Boeing та Alcoa передбачає утилізацію сплавів, які застосовуються у виготовленні компонентів крил та фюзеляжу літаків Boeing. Ця програма максимізує вартість всього ланцюжка поставок за одночасного зниження кількості відходів.

Також, Alcoa Fastening Systems (AFS) оголосив про нову угоду щодо стратегічних технологій комерційного співробітництва із китайським виробником комерційних літаків COMAC [83]. Вони займаються розробленням методів авіарециклінгу деталей конструкцій літака, виготовлених із композиційного матеріалу із вмістом вуглецевого волокна. Дослідження проходять у рамках проєкту Inasmet-Tecnalia, метою якого є отримання вуглецевого волокна із цього виду відходів.

Ці та інші подібні приклади свідчать, що утилізація, якщо її правильно планувати, організовувати і реалізовувати, цілком може як підвищувати ефективність експлуатації системи, так і приносити певний дохід фірмам, котрі займаються цим видом діяльності.

Зрозуміло також, що у ключових із цих процесів незаперечна значна роль системних інженерів.

5.5 Підсумки

• Продовження ролі системного інженера

Некоректно часто існуюче уявлення про те, що роль системного інженера в основному вичерпується першими двома стадіями життєвого циклу системи: стадіями передрозробки та розробки. Дійсно, багато проєктних рішень третьої стадії - построзробки, яка включає етапи виробництва, експлуатації, супроводу та утилізації, визначаються на першій і особливо на другій стадії – під час формування ескізного та технічних проєктів системи. Але, як і раніше, під час організації серійного виробництва, введення системи в експлуатацію і навіть її утилізації, роль системного інженера залишиться значною.

В ході освоєння системи у серійному виробництві – для складних інженерних систем цей період становить роки, системний інженер здійснює моніторинг процесу реалізації проєктних рішень у виробничих умовах, видає дозволи на тимчасові відхилення від документації, вносить корекції у розроблену документацію.

На етапі експлуатації, особливо у перші її періоди, потрібні консультації експлуатанту, часом виникає потреба у корекції конструкторсько-технічної та експлуатаційної документації.

Загальновизнана сьогодні роль системних інженерів у плануванні процесів виведення із обігу та подальшої утилізації системи. Проте, вона суттєва й у організації повторного використання компонентів системи, формуванні ефективних моделей рециклінгу основних конструкційних матеріалів.

• Підсумки етапу виробництва системи

Метою етапу виробництва є забезпечення ефективного виробництва системи, яке відповідає вимогам документації та відповідає потребам замовника за функціональними властивостями.

На цьому етапі в основному виявляються результати робіт, що організуються на попередніх двох стадіях та етапах життєвого циклу системи, особливо на етапі технічного проєктування. З урахуванням цього логічного, а не часового подання прийнято виділяти чотири основні дії, які забезпечують реалізацію процесів етапу виробництва системи:

- **Забезпечення технологічності системи у виробництві.** Для забезпечення ефективності конструкторсько-технологічних рішень у виробництві системи технологами розробляються рекомендаційні та регламентуючі документи. У них моделюється майбутній вигляд виробництва: структура, кооперація, комплектація, локалізація виробництва, основні постачальники матеріалів, напівфабрикатів, підсистем, окремо описуються вимоги до процесів інтеграції-складання

та валідації. Такий облік особливостей виробництва у процесі проєктування прийнято називати «паралельною інженерією». Власне, на етапі виробництва належить реалізувати всі ці вимоги. Роль системних інженерів полягає у забезпеченні ефективної взаємодії розробників та фахівців виробництва, виявленні та усуненні невідповідностей, внесенні, у разі потреби, корекції в конструкторсько-технологічну документацію.

- Другою дією щодо забезпечення етапу виробництва є **підготування до виробництва системи**. Починаються ці процеси на часовому інтервалі, що відноситься до етапів технічного проєктування та інтеграції стадії розробки.

У процесі підготування виробництва виконуються такі процедури та роботи:

- оцінка можливостей використання технологічного спорядження, розробленого для виготовлення дослідного зразка системи;
 - визначення складу технологічного оснащення та устаткування, які потрібно виготовити або замовити;
 - актуалізація планів пуско-налагоджувальних та інфраструктурних робіт;
 - вибір постачальників матеріалів, напівфабрикатів, погодження умов постачання, визначення логістичних ланцюжків постачання;
 - розроблення плану розгортання серійного виробництва системи.
- До третьої дії етапу виробництва відносять роботи із забезпечення **організації та технології виробництва**. Для організації виробництва складної інженерної системи

необхідно забезпечити ефективну участь у процесі багатьох субпідрядників: розробників і виробників нових підсистем, компонентів; нестандартних матеріалів; напівфабрикатів та технологій, а також постачальників стандартних підсистем, компонентів, технологій, матеріалів, напівфабрикатів. Потрібно скоординувати їхні дії, забезпечивши все це фінансовим та правовим ресурсом.

Дуже важливою є роль системних інженерів під час освоєння технологічних процесів у інтегратора-генпідрядника системи. Слід виходити із того, що технологічні процеси дослідного та серійного виробництва не ідентичні. Тому завжди виникатиме необхідність корекцій у конструкторсько-технологічній документації та у низці випадків, у проведенні додаткових досліджень та випробувань. Крім цього, необхідно звертати особливу увагу на те, щоб у гонитві за забезпеченням високих показників серійного виробництва не було принесено в жертву або щоб не постраждала функціональність системи.

- Завершальною дією на етапі виробництва є **приймальні випробування** системи. Мета цих випробувань - переконатися, що виготовлена система відповідає вимогам остаточно відкоригованої конструкторсько-технологічної документації, системи якості виробника, відповідає встановленим регламентам, а сама система може бути прийнята в експлуатацію. Системні інженери активно беруть участь у якості експертів, у визначенні складу та зміст випробувань.

• Підсумки етапу експлуатації та супроводу системи

Для складних інженерних систем майже завжди вимагають участі системного інженера, особливо ранні кроки їхньої експлуатації. Іноді може знадобитися корекція окремих людино-машинних інтерфейсів, тому що рядовий оператор може інакше, ніж фаховий випробувач сприймати і керувати системою. Можливі виходи із експлуатації окремих компонентів системи і може знадобитися корекція технології їх виготовлення.

Ці типові та низка інших корекцій допоможуть системному інженеру під час модернізації системи. Для складних і дорогих систем модернізація особливо потрібна, оскільки вони часом перебувають в експлуатації багато десятиків років – 30-70 років і більше.

Різні підсистеми та компоненти мають різні життєві періоди. Це дозволяє модернізувати систему за рахунок заміни застарілих підсистем та компонентів.

Особливістю сучасних системних підходів до модернізації є наступне:

- По-перше, модернізація системи може розглядатись як міні-проекти системи. При цьому використовується системний підхід: оцінка потреби, вибір концепції, реалізація інших стадій, етапів життєвого циклу, властивих системам.
- По-друге, ще на самих ранніх стадіях життєвого циклу системи застосовують так звану стратегію запланованого покращення, сутність якої в тому, що модернізація планується ще на стадії створення системи.

Модернізація виявляється більш економічно та технічно ефективною, якщо її здійснює розробник системи.

Одним із типових напрямків модернізації системи є використання нового програмного забезпечення. Фізично це легко здійснюється, тому що не вимагає змін у конструкції та її інтерфейсах. Проте заміна програмного продукту несе за собою специфічні ризики та потребує уваги з боку системних інженерів.

• Підсумки етапу утилізації системи

Сучасне розуміння утилізації системи – це комплекс організаційно-технічних, економічних, екологічних та інших заходів, що забезпечують демонтаж та перероблення компонентів та системи в цілому.

Зазвичай прийнято розділяти компоненти системи на три групи: такі, які можуть бути повторно використані, такі, що підлягають рециклінгу та такі, що становлять екологічну небезпеку і мають бути поховані або знищені.

Загальноприйнято сьогодні, що вимоги до процесів утилізації мають бути задані у технічному завданні на розробку систем, по суті, на стадії «передрозробки», а оформлені на стадії «розробки» – етапі технічного проектування.

Таким чином багато дій, групи процесів і процедур, що відносяться до етапу утилізації здійснюються на попередніх стадіях і етапах. Прийнято виділяти три основні групи процесів, що належать до етапу утилізації системи.

Перша група процесів – *усвідомлення актуальності проблеми утилізації*. Накопичення виведених із обігу систем мають тенденцію до зростання. Особливо це видно на прикладі місць зберігання списаної військової техніки.

Відзначено що, незважаючи на очевидну актуальність цієї проблеми, регламентація, вимоги щодо включення до життєвого циклу системи обов'язкових умов щодо її утилізації з'явилися відносно недавно. Це призводить до відсутності документованих процедур утилізації великої кількості експлуатованих та виведених їх із етапу експлуатації систем, що суттєво ускладнює їх утилізацію.

Друга група процесів, які стосуються етапу утилізації – це *планування утилізації*.

Для розроблених порівняно недавно систем роботи цього етапу передбачаються з моменту їх виробництва. Для новостворених систем планування робіт з утилізації має бути передбачено не пізніше стадії «розробки». Підкреслюється, що окремо концептуальні питання утилізації повинні бути у фокусі уваги системного інженера, починаючи із концептуальних етапів стадії «передрозробки».

Третя група процесів, які належать до етапу утилізації – *виконання процесів утилізації*.

Сучасне уявлення щодо утилізації систем передбачає, що її розробник має подати достатню та докладну інформацію, яка дозволяє ефективно організувати процеси утилізації. Якщо такої документації немає, її доводиться розробляти самостійно спеціалізованим на цей вид діяльності організаціям.

На прикладі стану справ із утилізацією повітряних суден (ПС) виявлено основні тенденції та проблемні питання у цій актуальній галузі діяльності:

Це - спеціалізація, що розвивається - з'являється все більше глобальних організацій, які спеціалізуються на утилізації ПС, будуються заводи з їхньої утилізації. Самостійним бізнесом стає

повторне використання компонентів та підсистем, після розбирання та дефектації ПС. Це стимулює експлуатантів швидше виводити з обігу застарілу техніку та збільшувати закупівлю сучасних авіалайнерів.

Більш складним і менш ефективним видом діяльності в галузі утилізації авіаційної техніки є вилучення та повторне використання конструкційних матеріалів: високоміцних сплавів алюмінію, титану, сталей та подібних до них, включаючи композиційні матеріали. Фахівці із вторинної переробки конструкційних матеріалів приходять до думки, що утилізація ПС у відриві від їхнього розроблення є економічно неспроможною через високі витрати на логістику, технічне оснащення та перероблення. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є створення спеціалізованих підприємств, які займаються утилізацією та формують свій базис відповідної нормативно-технічної документації щодо утилізованих систем. Інший шлях – формування замкнутих процесів рециклінгу, у якому безпосередньо бере участь металургійні підприємства.

Можна стверджувати, що утилізація, якщо її правильно спланувати, організувати та реалізувати, може впливати на підвищення ефективності експлуатації системи, а також приносити певний дохід фірмам, які займаються цим видом діяльності. У багатьох із цих процесів щодо вироблення процедур їх реалізації значуща роль належить – системним інженерам.

Питання для самоконтролю глави 5

1. Чому роль системної інженерії та системних інженерів не має обмежуватися завданнями перших двох стадій життєвого циклу системи?
2. В чому сутність забезпечення технологічності системи у виробництві на етапі виробництва системи (на стадії построзробки)?
3. В чому сутність підготовлення до виробництва на етапі виробництва системи (на стадії построзробки)?
4. В чому сутність організації та технології виробництва на етапі виробництва системи (на стадії построзробки)?
5. В чому сутність приймальних випробувань системи на етапі виробництва системи (на стадії построзробки)?
6. В чому сутність освоєння в експлуатації на етапі експлуатації та супроводу системи (на стадії построзробки)?
7. В чому сутність супроводу в експлуатації на етапі експлуатації та супроводу системи (на стадії построзробки)?
8. В чому сутність модернізації на етапі експлуатації та супроводу системи (на стадії построзробки)?
9. В чому сутність усвідомлення актуальності проблеми утилізації на етапі утилізації системи (на стадії построзробки)?
10. В чому сутність планування утилізації на етапі утилізації системи (на стадії построзробки)?
11. В чому сутність виконання процесів утилізації на етапі утилізації системи (на стадії построзробки)?

Усталені аббревіатури, прийняті скорочення та їхні розкриття

AFRA	Aircraft Fleet Recycling Association, Асоціація з утилізації парку повітряних суден
ANSI	American national standards institute, Американський національний інститут стандартів, об'єднання американських промислових та ділових груп, що розробляє торгові та комунікаційні стандарти
EDM	Engineering Development Model, дослідний зразок
EIA	Electronics Industries Association, альянс галузей електронної промисловості, який розробляє стандарти з ідентифікатором RS (Recommended Standards)
FAA	Federal Aviation Administration, Федеральне управління цивільної авіації США (або Федеральна авіаційна адміністрація) - уповноважений орган уряду Сполучених Штатів Америки в галузі цивільної авіації
IAA	International Aircraft Associates
IEC	International Electrotechnical Commission, Міжнародна електротехнічна комісія, міжнародна організація зі стандартизації у

сфері електричних, електронних і суміжних технологій

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Інститут інженерів з електротехніки та електроніки, міжнародна організація інженерів у галузі електротехніки, радіоелектроніки та радіоелектронної промисловості
IDEF	I-CAM DEFinition або Integrated DEFinition, методології сімейства ICAM (Integrated Computer-Aided Manufacturing) для вирішення задач моделювання складних систем
INCOSE	International Council on Systems Engineering, міжнародна рада з системної інженерії
ISO	International Organization for Standardization, Міжнародна організація зі стандартизації
MIL-STD	Military Standard, военний стандарт США
MOE	Measures of Effectiveness, якісний чи кількісний показник, що характеризує поведінку системи загалом
MOP	Measures of Performance, кількісний показник, який служить для опису характеристик системи або її окремих властивостей чи підсистем

NASA	National Aeronautics and Space Administration, Національне управління з аеронавтики та дослідження космічного простору
PMBOK	Project Management Body Of Knowledge,
PDR	Preliminary Design Review, попередній аналіз проєктних рішень
RFI	Request for Information, запит інформації
RFP	Request for Proposal, запит пропозиції
SEBoK	The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge, документ надає розгорнуте уявлення успішної системи та багато інших визначень системного підходу
SEMP	Systems Engineering Management Plan, визначає основні види дій, притаманні для системної інженерії: управління програмною розробкою; процес системної інженерії – вимога аналізу функціонування, компроміси; інтеграція із суміжними для системи областями проєктування, відповідальними за надійність, виготовлення, безпеку, ремонтпридатність, ергономічність
SOI	System of Interest, система, що розглядається (System-of-Interest) - система, життєвий цикл

якої розглядають у контексті стандарту
ISO/IEC/IEEE 15288:2015

WBS	Work Breakdown Structure, структура декомпозиції робіт, також ієрархічна структура робіт – у проєктному менеджменті та системотехніці є орієнтованою на dokonane виконання проєкту декомпозицією проєкту на менші частки
АНТК	авіаційний науково-технічний комплекс
АП	авіаційна промисловість
БПЛА	безпілотний літальний апарат
ВПК	військово-промисловий комплекс
ВПС	військово-повітряні сили
ВТ	військова техніка
ГОСТ	Государственный стандарт, одна з основних категорій стандартів в СРСР; прийнятий як міждержавний стандарт в СНД
ДКР	дослідно-конструкторська робота
ДСТУ	Державний стандарт України
ДТМ	директивні технологічні матеріали
ЄС	Європейський Союз

КД	конструкторська документація
МАК	міжнародний авіаційний комітет
МО	міністерство оборони
НДІ	науково-дослідний інститут
НДДКР	науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи
ОВТ	озброєння та військової техніки
ПС	повітряне судно
СНД	Співдружність незалежних держав
США	Сполучені Штати Америки

Література

1. ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016 Інженерія систем і програмного забезпечення. Процеси життєвого циклу систем (ISO/IEC/IEEE 15288:2015, IDT).
2. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering – System life cycle processes.
3. Системное мышление 2020 / А. Левенчук – «Издательские решения», ISBN 978-5-4490-4439-6.
4. Вторая фраза в определении системной инженерии из SEBoK: It focuses on holistically and concurrently understanding stakeholder needs; exploring opportunities; documenting requirements; and synthesizing, verifying, validating, and evolving solutions while considering the complete problem, from system concept exploration through system disposal.
5. Дружинин В.В., Конторов Д. С. Системотехника. – М.: Радио и связь, 1985. — 200 с., Ил. 44. Табл. 6. Библиогр. 46 назв.
6. Косяков А., Свит У., и др. Системная инженерия. Принципы и практика. Пер. с англ. под ред. В. К. Батоврина. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 624 с.: ил., ISBN 978-5-97060-122-8.
7. Кривов Г. О. Як зробити гроші для фінансування науки і навіщо суспільству наукоємна промисловість / Г. О. Кривов, В. М. Шулепов // Технологические системы. – № 3 (68). – 2014. – С. 9–11. – ISSN 2074-0603.
8. <https://www.incose.org/>
9. Seth Lloyd Measures of Complexity a non-exhaustive list (<http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/Complexity.PDF>).

10. Кривов Г. А. УкрНИИАТ продолжает динамично работать в сложной сфере наукоёмкого консалтинга / Г. А. Кривов // Технологические системы. – № 3 (88). – 2019. – С. 7–22. – ISSN 2074-0603 [dx.doi.org/10.29010/88.1].
11. Edsger W. Dijkstra, Selected Writings on Computing: A Personal Perspective, Springer-Verlag, 1982. ISBN 0–387–90652–5.
12. Кривов Г. А. Технология – определяющий фактор конкурентоспособности авиационной техники / Г. А. Кривов, К. О. Зворыкин // Технологические системы. – № 2 (42). – 2008. – С. 5–18. – ISSN 2074-0603.
13. <http://www.sebokwiki.org/>
14. ISO/IEC/IEEE 24765:2010 Systems and software engineering — Vocabulary.
15. Good H., Machol R. System Engineering. An introduction to the design of large-scale systems. N. Y.: McGraw-Hill Book Company, 1957. (Имеется перевод: Гуд Г. Х., Макол Р. Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем: Пер. с англ./ Под ред. Г. Н. Поварова. М.: Сов. радио, 1962.).
16. Hall A. D. A Methodology for Systems Engineering. Van Nostrand, New York, 1962. (Имеется перевод: Холл А. Опыт методологии для системотехники: Пер. с англ. / Под ред. Г. Н. Поварова. М: Сов. радио, 1975.).
17. Chestnut H. Systems Engineering Tools. Wiley, New York, 1965. (Имеется перевод: Честнат Г. Техника больших систем (средства системотехники): Пер. с англ./ Под ред. О. И. Авена. М.: Энергия, 1969.).

18. Ramo S., St. Clair R. K. The Systems Approach. Fresh Solutions to Complex Problems Through Combining Science and Practical Common Sense. KNI, INCORPORATED, 1998.
19. Blanchard B., Fabrycky W. Systems Engineering and Analysis. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1981.
20. Sage A. Systems Engineering. Wiley, New York, 1992, а также Sage A. Systems Management for Information Technology and Software Engineering. Wiley, New York, 1995.
21. <https://acqnotes.com/acqnote/acquisitions/acquisition-phases>
22. ISO 21500:2021 Project, programme and portfolio management — Context and concepts.
23. Руководство к своду знаний по управлению проектом (Руководство PMBOK) (A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide) / Институт управления проектами / Шестое издание. ISBN: 978-1-62825-193-7.
24. ГОСТ Р 58849-2020 Авиационная техника гражданского назначения. Порядок создания. Основные положения.
25. AFSC Manual 375-5, Systems Engineering Management Procedures. Headquarters, Air Force Systems Command, Andrews Air Force Base, Washington, D. C., March 10, 1966.
26. MIL-STD-499, Military Standard: System Engineering Management, Commander, Air Force Systems Command, Andrews AFB, Washington, D. C., 17 Jul 1969.
27. MIL-STD-499B (USAF), Systems Engineering, For Coordination Draft. Department of Defense. Washington, D. C., May 1992.
28. ANSI/EIA 632 Processes for Engineering a System. Government Electronics and Information Technology

- Association, Standard & Technology Department. Washington, 1999.
29. ISO/IEC 26702:2007 Systems engineering — Application and management of the systems engineering process.
 30. ГОСТ В 15.208-82 Система разработки и постановки на производство военной техники. Единый сквозной план создания образца (системы, комплекса) и его (их) составных частей. Основные положения.
 31. ISO/IEC/IEEE 12207:2017 Systems and software engineering — Software life cycle processes.
 32. ISO/IEC/IEEE 42010:2011 Systems and software engineering — Architecture description.
 33. Object Management Group, Kernel and Language for Software Engineering Methods (Essence), Version 1.0, November 2014.
 34. IEC 81346-1:2009 Industrial systems, installations and equipment and industrial products — Structuring principles and reference designations — Part 1: Basic rules.
 35. ISO 15926-1:2004 Industrial automation systems and integration — Integration of life-cycle data for process plants including oil and gas production facilities — Part 1: Overview and fundamental principles.
 36. NATO STANDARD: AAP-20 – NATO Programme Management Framework (NATO Life Cycle Model), October 2015.
 37. NATO STANDARD: AAP-48 – NATO System Life Cycle Processes, Mars 2013.
 38. NATO Research Technology Organization, System Analysis and Studies Panel, Task Group 069, RTO-SAS-069, September 2009.

39. NATO Independent Cost Estimating and the Role of Life Cycle Cost Analysis in Managing the Defence Enterprise, This Report presents the findings of Task Group SAS-076, RTO-TR-SAS-076, August 2012. ISBN 978-92-837-0162-0.
40. ГОСТ В 15.004-84 Система разработки и постановки на производство военной техники. Стадии жизненного цикла изделий и материалов.
41. ДСТУ В-П 15.004:2019 Система розроблення і поставлення на виробництво озброєння та військової техніки. Стадії життєвого циклу озброєння та військової техніки.
42. ГОСТ 2.711-82 Схема деления изделия на составные части.
43. Непревзойденный «Руслан» и его творцы. История создания самолета Ан-124 / сост. О. К. Богданов. – КВИЦ, 2019. – 232с.: ил. ISBN 978-617-697-103-0.
44. IEC 81346-1:2009 Industrial systems, installations and equipment and industrial products — Structuring principles and reference designations — Part 1: Basic rules.
45. <https://en.wikipedia.org/wiki/IDEF>
46. https://en.wikipedia.org/wiki/Use_case_diagram
47. https://en.wikipedia.org/wiki/Operations_research
48. Harold Kerzner Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling, 11th Edition, ISBN: 978-1-118-41585-6.
49. <http://www.managersystem.ru/geds-459-1.html>
50. https://en.wikipedia.org/wiki/Rational_Unified_Process
51. Barry Boehm, edited by Wilfred J. Hansen Spiral Development: Experience, Principles, and Refinements, CMU/SEI-2000-SR-008.

52. Barry Boehm, Incremental Commitment Spiral Model. The: Principles and Practices for Successful Systems and Software, Illustrated Edition.
53. Forsberg, K., Mooz, H., 1991, The Relationship of System Engineering to the Project Cycle, Chattanooga, Tennessee: Proceedings of the National Council for Systems Engineering (NCOSE) Conference, pp. 57—65.
54. ГОСТ Р 57193-2016 Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем (ISO/IEC/IEEE 15288:2015, NEQ).
55. ГОСТ РВ 15.103-2004 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника порядок выполнения аванпроекта и его составных частей. Основные положения.
56. ГОСТ РВ 15.004-2004 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Стадии жизненного цикла изделий и материалов.
57. ISO/IEC TR 24748-2:2011 Systems and software engineering — Life cycle management — Part 2: Guide to the application of ISO/IEC 15288 (System life cycle processes).
58. ДСТУ 3974-2000 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення.
59. Benjamin S. Blanchard, John E. Blyler System Engineering Management, 5th Edition, ISBN: 9781119225317.
60. ДСТУ 3278-95 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення.

61. ДСТУ В-П 15.001:2018 Система розроблення і поставлення на виробництво озброєння та військової техніки. Основні положення.
62. Кривов Г. А. Развитие концептуальных подходов к формированию исходных данных сложных проектов / Г. А. Кривов // Матеріали науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». – № XX. – 2019. – С. 350–357.
63. Кривова С. Г., Шулепов В. М. Щодо оптимізації процедур участі у міжнародних науково-дослідних програмах у галузі авіабудування / С. Г. Кривова, В. М. Шулепов // Технологические системы. – № 3 (88). – 2019. – С. 99–105. – ISSN 2074-0603, [dx.doi.org/10.29010/88.12].
64. Кривова С. Г., Зубаньов О. Є. Підходи щодо корекції ранніх стадій проектів наукоємного машинобудування / С. Г. Кривова, О. Є. Зубаньов // Технологические системы. – № 4 (89). – 2019. – С. 45–49. – ISSN 2074-0603, [dx.doi.org/10.29010/89.7].
65. ISO/IEC/IEEE 29148:2018 Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering.
66. Халл Э., Джексон К., Дик Дж. Инженерия требований / пер. с англ. А. Снастина; под ред. В. К. Батоврина. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 218 с.: ил. ISBN 978-5-97060-214 -0.
67. <https://www.facebook.com/photo.php?fbid=663827920300162&id=392751580741132&set=a.403690762980547>
68. <https://www.compositesworld.com/articles/the-first-composite-fuselage-section-for-the-first-composite-commercial-jet>

69. https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_Martin_F-35_Lightning_II
70. Управління проектами в наукоємному машинобудуванні. Навчальний посібник / Г. О. Кривов, К. О. Зворикін, С. Г. Кривова. – Київ: КВІЦ, 2021. – 204 с. : іл. : 6 табл. ISBN 978-617-693-141-2.
71. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
72. ДСТУ 3021-95 Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення.
73. <https://www.aerospacetestinginternational.com/features/how-digital-image-correlation-is-maturing-into-an-accurate-and-trusted-tool-for-aerospace-engineers.html#prettyPhoto>
74. ГОСТ 2.103-2013 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки.
75. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
76. Бойченко С. В., Иванченко О. В., Яковлева А. В. Рециклінг і утилізація авіаційної техніки: світові тенденції та особливості впровадження / С. В. Бойченко, О. В. Иванченко, А. В. Яковлева // Наукоємні технології. – № 2 (34). – 2017. – С. 140–149. – ISSN 2075-0781, DOI: 10.18372/2310-5461.34.11612.
77. Samira Keivanpour. Toward a Strategic Approach to End-of-Life Aircraft Recycling Projects A Research Agenda in Transdisciplinary Context / Samira Keivanpour, Daoud Ait-Kadi, Christian Mascle. // Journal of Management and

- Sustainability. — 2013. — С. 76—94.
DOI:10.5539/jms.v3n3p76 (eng).
78. В сети появилось видео крупнейшего в мире «кладбища» авиатехники [Электронный ресурс] / РИА Новости // РИА Новости. — 2017 — Режим доступа: <https://ria.ru/world/20170130/1486810050.html>.
 79. Даулинг Стивен. Авиабазы Девис-Монтен — крупнейшее в мире «кладбище» авиатехники [Электронный ресурс] / Стивен Даулинг // Quibbll. — 2017. — Режим доступа: <http://quibbll.com/55834-aviabaza-devis-montenkrupnejshee-v-mire-kladbishhe-aviatehniki/>
 80. Гришкова М. О. Проблемы утилизации отслуживших самолётов / М. О. Гришкова, А. В. Разин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2014. — С. 114–115.
 81. <https://arttravelblog.ru/dostoprimechatelnosti/amerikanskaya-aviabaza-devis-monten-samoe-bolshoe-kladbishhe-samoletov-v-mire.html>
 82. <https://judgesuhov.livejournal.com/123804.html>
 83. Іванченко О. В. Екологістика, утилізація та рециклінг транспортних засобів — особливості в авіації / О. В. Іванченко, С. В. Бойченко, К. Лейда // Monografia № 7. Seria: Transport. Systemy i środki transportu samochodowego: wibrane zagadnienia. — Rzeszów (Poland), 2016. — P. 45–52.